

# PRV

PATENT- OCH REGISTRERINGSVERKET  
Patentavdelningen

09/937670

PCT/ SE 00 / 0 0 7 2 4

SE00/-4

REC'D 03 JUL 2000

WIPO

PCT

4  
Intyg  
Certificate



Härmed intygas att bifogade kopior överensstämmer med de handlingar som ursprungligen ingivits till Patent- och registreringsverket i nedannämnda ansökan.

*This is to certify that the annexed is a true copy of the documents as originally filed with the Patent- and Registration Office in connection with the following patent application.*

(71) Sökande                      ABB AB, Västerås SE  
Applicant (s)

(21) Patentansökningsnummer    9901553-9  
Patent application number

(86) Ingivningsdatum                      1999-04-30  
Date of filing

Stockholm, 2000-06-14

För Patent- och registreringsverket  
For the Patent- and Registration Office

*Åsa Bodin*

Åsa Bodin

Avgift  
Fee

## PRIORITY DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

PATENT- OCH  
REGISTRERINGSVERKET  
SWEDEN

Postadress/Adress  
Box 5055  
S-102 42 STOCKHOLM

Telefon/Phone  
+46 8 782 25 00  
Vx 08-782 25 00

Telex  
17978  
PATOREG S

Telefax  
+46 8 666 02 86  
08-666 02 86

5 KN 8631 SE  
GL  
1999-04-15

10

Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal

15

# TEKNISKT OMRÅDE

Föreliggande uppfinning avser en elektrisk roterande växelströmsmaskin som i sitt basutförande består av en huvudmaskin och en reglermaskin med  
20 gemensam mekanisk axel samt en med axeln roterande strömriktare vilket medger borstlös styrning av maskinen. Huvudmaskinen är försedd med en statorlindning ansluten till ett distributions- eller transmissionskraftnät för mellan- eller högspänning, dvs för 1 kV och upp till högre spänningar.

25 Uppfinningen innefattar ett förfarande vid användning av den medroterande strömriktaren.

Maskinen kan användas för omvandling mellan mekanisk och elektrisk effekt respektive omvandling av elektrisk till mekanisk effekt. Detta innebär  
30 att maskinen kan fungera både som generator och motor. I samband med omvandlingen kan både den aktiva och den reaktiva effekt som är förknippad med den aktuella driften regleras.

Vid generatordrift kan frekvensen hos statorlindningens genererade spänning  
35 hållas konstant lika med nätfrekvensen vid varierande varvtal hos maskinen.

Vid motordrift är statorlindningen ansluten till ett kraftnät. Drift med varierbart varvtal styrs borstlöst via reglermaskinen och den medroterande strömriktaren.  
40

Uppfinningen har sitt främsta applikationsområde för stora maskineffekter. När det gäller generatordrift ligger typiska tillämpningar inom området

- 5 3 – 300 MW. Motordrifter på upp till 100 MW och högre kan tillverkas. Maskineffekter både under och över nämnda effektområden kan med fördel komma till användning.

- 10 Maskinen kan komma till användning i samband med vattenkraftsmaskiner, pumpkraftverk, vindkraftverk, gas- och ångturbiner samt som faskompensator, effektlödesregulator och transmissionslänk i kraftnätssammanhang, och som drivkälla för olika motordrifter.

- 15 De redovisade utföringsexemplen av uppfinningen och redogörelsen för teknikens ståndpunkt visar s k radialflödesmaskiner. Maskinen kan också helt eller delvis utföras med en eller flera axialflödesmaskiner.

- 20 När det gäller maskiner för generering av elektrisk effekt finns ett flertal vedertagna begrepp som elgenerator, elkraftgenerator, vattenkraftgenerator, hydrogenerator m fl. I denna patentskrift kommer dessa "generatorer" att omtalas som "elgenerator" om det inte av sammanhanget är nödvändigt med en närmare specificering.

## 25 TEKNIKENS STÅNDPUNKT, PROBLEMEN

- Generellt gäller för växelströmsmaskiner att de kan användas för både generatordrift och motordrift, men att de optimala utföringsformerna skiljer sig något. Det finns således en "teknikens ståndpunkt" som är specifik för  
30 de båda driftfallen.

- Vid generatordrift är maskinens uppgift att alstra elektrisk effekt. För att kunna göra detta drivs elgeneratoren av en drivanordning varvid mekanisk effekt omvandlas till elektrisk effekt. Eftersom generering av elektrisk  
35 effekt i regel är förknippad med kraftnät ställs specifika krav på konstanthållande av både spänning och frekvens samt på styrning och reglering av både aktiv och reaktiv effekt. Nedan följande beskrivning av teknikens ståndpunkt, när det gäller generatordrift, kommer följaktligen att till stor del handla om hur man förfar för att uppnå önskade prestanda  
40 avseende dessa parametrar.

Då en växelströmsmaskin används i en motordrift omvandlas elektrisk effekt till mekanisk effekt där omvandlingen i växande andel är förknippad med varvvalsreglering av utgående axel, dvs av maskinens varvtal. Detta gäller

- 5 speciellt vid tillämpning av rubricerade uppfinning. Beskrivningen av teknikens ståndpunkt nedan när det gäller motordrifter kommer följaktligen huvudsakligen att handla om varvtalsreglerade motordrifter. Främst avser motordrifter reglering av moment och varvtal hos utgående axel. Motordrifter är dock på samma sätt som generering även förknippat med styrning och reglering av både aktiv och reaktiv effekt.

- Ett väsentligt problemområde när det gäller motordrifter med växelströmsmaskiner är deras start, dvs uppkörning från noll varvtal till aktuellt reglerområde runt synkront varvtal. Redogörelsen för teknikens ståndpunkt kommer också att innefatta beskrivning av befintlig startmetodik för att kunna påvisa de förbättrade startförfaranden som står till buds med växelströmsmaskiner enligt uppfinningen.

- Som omtalat under "TEKNISKT OMRÅDE" kommer uppfinningen att innefatta en strömriktare. Beskrivningen av teknikens ståndpunkt både när det gäller generatordrift och motordrift kommer därför huvudsakligen att referera till utföringsformer där strömriktare ingår. Ur elektrisk synpunkt beskrivs aktuella strömriktare med hjälp av etablerade grundläggande symboler enligt figur 1 som entydigt beskriver deras funktion, dvs enligt

- 25 fig 1a som avser omvandling från AC till DC, vs-ls-omvandling, enligt

fig 1b som avser omvandling från DC till AC, ls-vs-omvandling, enligt

- 30 fig 1c som avser en vs-vs-omvandling, och enligt

fig 1d som avser omvandling från en likspänning till en annan likspänning.

- De vs-vs-omvandlare som kommer i fråga för utförandet av uppfinningen benämns enligt engelsk terminologi "ac-to-ac bidirectional converters" och förklaras i Websters El. Eng. Handbook, Wiley 1999, under avsnittet AC-AC POWER CONVERTERS, skrivet av Rik W. De Doncker, Aachen University of Technology. Det engelska begreppet "converter" översätts till svenska omväxlande med strömriktare, omriktare och omvandlare. Med begreppet vs-vs-omvandlare förstås i detta sammanhang omvandling av frekvens och/eller amplitud.

Strömriktarkopplingar för stora effekter utförs för närvarande mest med kiselbaserade tyristorer. Dessa kopplingar kräver ofta stora reaktiva effekter

- 5 p g a att vs-nätets strömmar får stor fasförskjutning relativt dess spänningar. Detta innebär att dimensioneringen av maskiner för strömriktarbaserade system och av strömriktare måste ta hänsyn till reaktiva effektlöden, dvs till reaktiva förluster i maskiners och vs-näts reaktanser och till behov av faskompensering, således inte enbart till de rent aktiva effektlödena med  
10 mer eller mindre försumbara aktiva förluster.

Ur mekanisk synpunkt byggs enligt teknikens ståndpunkt strömriktare som kommer till användning i sammanhang som rör elektriska maskiner normalt såsom enheter, som står vid sidan av maskinen eller monteras fast på dess  
15 stator. Under de senaste decennierna har man börjat montera strömriktare fast på de roterande delarna, dvs i eller på den roterande delen, exempelvis som delar av ett roterande borstlöst system för likströmsmagnetisering av synkronmaskiner enligt nedan. I vissa sammanhang förekommer också strömriktarstyrda rotormotstånd.

20 En strömriktarkoppling som är mycket viktig i rubricerade sammanhang är en koppling enligt figur 1c, dvs en koppling som avser frekvens- eller vs-vs-omvandling. Funktionen hos en vs-vs-omvandlare kan åstadkommas på flera olika sätt. Ett principiellt sätt är att omvandlingen sker med vs-ls-vs-  
25 omvandling, dvs med ls-mellanled. Ett annat sätt är att omvandlingen åstadkoms med direkt vs-vs-omvandling som kan ske i olika utföringsformer. Exempel på sådana är omvandling med s k cykloconverters med nätkommuterade dubbelströmriktare eller med s k matrisomriktare med självkommuterade dubbelriktade krafthalvledare.

30 Eftersom det i detta sammanhang endast är huvudfunktionerna som energiomvandlare som är aktuella kommer detaljbeskrivning och styrning, skydd, reglering m m av strömriktare samt kommunikation av signaler till och från roterande delar inte att beröras i denna skrift.

35 Både när det gäller generatordrift och motordrift av växelströmsmaskiner förekommer ett välkänt begrepp som benämnes synkront varvtal. Det finns ett entydigt samband mellan rotorns rotationshastighet ( $n_r$ , r/min), maskinens poltal ( $p$ ) och frekvens ( $f_s$ , Hz) hos maskinens spänning.

40 Sambandet vid synkron drift redovisas oftast som:

$$n_r = (2/p) \cdot f_s \cdot 60 \quad (1)$$

- 5 Den närmast följande delen av teknikens ståndpunkt handlar om växelströmsmaskinernas användning som elgenerator.

Man utgår från ett elgenererande aggregat i form av en elgenerator och en till denna mekaniskt kopplad drivanordning i form av en turbin, drivmotor  
10 av något slag eller liknande. För att elgeneratoren skall kunna kopplas till ett kraftnät och bidra till kraftnätets elförsörjning krävs att elgenerators spänning, eventuellt via en transformator, anpassas till kraftnätets spänning samt att spänningens frekvens överensstämmer med kraftnätets frekvens.

- 15 För att åstadkomma den önskade och konstanta frekvensen krävs således, med givet pötal, att aggregatet roterar med ett konstant varvtal vilket innebär att drivanordningen måste ha någon form av reglerutrustning för olika belastningsförhållande med mera. Varierande vattenflöde, fallhöjd och nätpendlingar kräver både statisk och dynamisk noggrannhet hos  
20 frekvensregleringen av vattenkraftsgeneratorer.

Inledningsvis skall ges en kortfattad beskrivning av hur magnetiseringssystemen för elgeneratorer som roterar med "konstant" varvtal är utformade enligt dagens teknik. Detta sker delvis med s k borstlös  
25 magnetisering med hjälp av en medroterande matare och strömriktare.

Ett exempel på en utformning av en borstlös matare framgår av ABB-broschyren "Brushless exciter", SEGEN/HM 8-001. Av broschyren framgår att mataren är en växelströmsmaskin vars stator är försedd med utpräglade  
30 poler och vars rotor har en trefas växelströmslindning för matning av ovan nämnda strömriktare, företrädesvis en sexpuls strömriktarbrygga. Strömriktarens likspänning,  $I_s$ , ansluts sedan till elgenerators fältlindning. Elgenerators spänningsreglering sker genom att påverka matarens magnetisering via dess statorlindning (fältlindning). Att ha en medroterande  
35 strömriktare för vs- $I_s$ -omvandling och likströmsmagnetisering av polsystemet hos elgeneratorer med "konstant" varvtal är således känd teknik.

Figur 2 visar principiellt hur en borstlös matare kommer till användning i konventionella elgeneratorer, dvs med spänningar upp till 25 kV. Här visas  
40 en vertikalaxlad elgenerator 1 som på den gemensamma axeln 2 är anordnad med elgenerators rotor med lindning 3, matarens roterande växelströmslindning 4, medroterande strömriktare 5 och drivanordning i form av en turbin 6. Elgenerators stator 7 är via en step-up- transformator 8 ansluten till ett högspänningsnät. Av figur 2 framgår även matarens

- stationära fältlindning 9. Figur 3 visar motsvarande utföringsform av magnetiseringssystemet där elgeneratoren är utformad som en högspänningsgenerator enligt WO 97/45919. Någon transformator för anslutning till ett högspänningsnät behövs då inte. Hänvisningssiffrorna är i övrigt desamma som i figur 2. I figur 4 visas motsvarande utföringsform av magnetiseringssystemet där elgenerator enligt WO 97/45907 är utformad som en högspänningsgenerator med 2x3-fas för matning av en HVDC-anläggning 10 med 12-pulskoppling. Hänvisningssiffrorna är i övrigt desamma som i figur 2.
- En speciell utföringsform av likströmsmagnetisering hos en med konstant varvtal roterande elmaskin beskrivs i en patentansökan PCT/EP 98/007744, för "Power flow control" i en transmissionslinje. Elmaskinens statorlindningar är här inkopplade i serie med transmissionslinjens ledare utan hopkopplad neutralpunkt. Elmaskinens rotor är försedd med två/tre 90/120 grader elektriskt förskjutna likströmsrotorlindningar för reglering av amplitud och fas hos elmaskinens spänning. Matning av rotorlindningarna sker via en medroterande magnetiseringsmatare och strömriktare/vs-ls-omvandlare för var och en av rotorlindningarna.
- Enligt IEC 34-1/2 finns normerade tillåtna frekvens- och spänningsavvikelser för elgeneratorer. För att klara elgeneratorns skenbara märkeffekt skall elgeneratorns arbetspunkt ligga inom en s k A-zon som (i stort) begränsas av  $\pm 2\%$  vad frekvens beträffar och  $\pm 5\%$  vad spänning beträffar. Arbetspunkten tillåts dock få ligga inom en s k B-zon som (i stort) begränsas av  $+3$  och  $-5\%$  vad frekvens beträffar och  $\pm 8\%$  vad spänning beträffar.
- För konventionella elgeneratorer med likströmsmagnetiserade poler gäller som anförts ovan ett givet och fast förhållande mellan den genererade spänningens frekvens och rotationshastighet hos rotorn vid givet poltal. Att ansluta en elgenerator till ett styvt kraftnät där elgeneratorns synkrona hastighet/frekvens avviker från nätets frekvens innebär väsentligt ökade förluster hos elgeneratoren. Om nu ett normalt arbetande 50 Hz-kraftnät av olika skäl håller  $2\%$  lägre frekvens kommer en ansluten elgenerator ändå att arbeta med en synkron frekvens om rotorns rotationshastighet är  $2\%$  lägre än nominell hastighet. Även om man på detta sätt under vissa förutsättningar kan få synkrona förhållanden innebär varierande varvtal hos en ansluten elgenerator stora problem, speciellt som det kan vara svårt nog att tillåta varvtalsvariationerna så stora som tekniskt-ekonomiskt önskvärda  $\pm 10\%$ .

- 5 För att lösa dessa problem har frekvensregleringen hos elgeneratorer med varierande rotationshastighet fått lösas på andra sätt. För detta ändamål finns enligt teknikens ståndpunkt olika utföringsformer av vilka ett antal skall redovisas nedan.
- 10 Principiellt är ett av de enklaste sätten att åstadkomma rätt frekvens för nätanslutning av en elgenerator, vars varvtal varierar inom ovan anförda gränser, att mellan generator och kraftnät ansluta en vs-vs-omvandlare enligt figur 1c. Ur ekonomisk synpunkt är detta dock ett mycket tveksamt utförande eftersom vs-vs-omvandlaren måste dimensioneras för full effekt.
- 15 De utföringsformer som enligt teknikens ståndpunkt har kommit till användning är dock huvudsakligen baserade på en annan inom elläran för sådana maskiner känd princip, se t ex nedan nämnda artikel i Hitachi Review. Principen skall här exemplifieras med hjälp av ett sifferexempel
- 20 med utgångspunkt från en elgenerator som skall generera en spänning med frekvensen 50 Hz. Ett typiskt vattenkraftverk dimensioneras för ett basvarvtal på 375 r/min och har följaktligen, enligt ekvation (1) 16 poler. Om aggregatet av olika skäl drivs av turbinen att rotera med 360 r/min skulle elgeneratorns synkrona frekvens vid likströmsmagnetisering av rotorpolerna
- 25 enligt ekvation (1) generera en spänning med frekvensen 48 Hz.

Om man utformar rotorlindningen som en vs-lindning och matar denna lindning med en spänning med skillnadsfrekvensen mellan den synkrona frekvensen  $f_r$  vid 360 r/min och den önskade frekvensen 50 Hz, dvs med

30  $f_c = 2$  Hz, kommer frekvensen hos elgeneratorm att vara  $f_s = 50$  Hz. Generellt gäller att ekvation (1) omvandlas till

$$n_r = (2/p) \cdot (f_s + f_c) \cdot 60 \quad (2)$$

- 35 där  $f_c$  är den aktuella skillnadsfrekvensen. Ett system för konstanthållande av elgeneratorns frekvens skall således se till att, oberoende av aktuellt varvtal hos drivanordningen, rotorlindningen förses med en spänning med aktuell skillnadsfrekvens både vad avser undersynkron och översynkron drift. Denna princip tillämpas på olika sätt eller med olika utföringsformer.
- 40 Typiskt för kända utföringsformer är att rotoranslutningarna sker via trefas släpningar, som överför hela axeleffekten eller en stor del av densamma.

I US 5,742,515, "Asynchronous conversion method and apparatus for use with variable speed turbine hydroelectric generation", beskrivs ett



5 hydroelektriskt kraftgenereringssystem som genererar elektrisk effekt till ett  
kraftnät. Sammanfattningsvis kan den elgenererande delen av systemet  
beskrivas med utgångspunkt från figur 5 där ingående delar är ritade med  
samma figursymboler och hänvisningssiffror som i figurerna 2 - 4. Systemet  
innefattar, enligt patentkrav 19 i nämnda US-patent, (för att förtydliga  
10 hänvisningen till US-patentet används här hydro-/turbín, -generator,  
-maskin osv) "en vattendriven hydroturbín 6 med en hydrogenerator 1 för  
alstring av hydroelektrisk effekt och en roterande omformare 11 kopplad till  
hydromaskinen för överföring av hydromaskinens elektriska effekt till  
15 kraftnätet. Den roterande omformaren innefattar en rotorlindning 12 och en  
statorlindning 13 av vilka rotorlindningen eller statorlindningen är kopplad  
till hydroturbinenheten och den andra via en transformator 8 till det  
högspända kraftnätet.....". Av beskrivningen i övrigt framgår att  
hydrogeneratoren 1 innefattar en axel 2 som är anordnad med  
20 hydrogenerators rotor med lindning 3 och en mätarens roterande  
växelströmslindning 4. Det framgår inte av figurer eller text i patentet om  
"exciter power supply" (fig 1A, 62) är en medroterande strömriktare eller  
om likströmsmagnetiseringen sker via en stationär strömriktare och  
överföring via två släpringar. Principiellt är detta likvärdiga lösningar men  
25 för jämförelse med övriga utföranden anges i figur 5 att magnetiseringen  
sker via en medroterande strömriktare 5. Av figur 5 framgår även mätarens  
stationära fältlindning 9 samt hydrogenerators statorlindning 7. Denna del  
av figur 5 är som det framgår identisk med figur 2.

Av beskrivningen i övrigt framgår att, i enlighet med figur 5,  
30 hydrogenerators statoreffekt överförs via släpringar 14 på den roterande  
omformaren 11 till dennas rotorlindning 12. Den i omformarens  
statorlindning 13 inducerade spänningen är kopplad via en transformator 8  
till kraftnätet. Omformarens 11 uppgift är således att förse systemet med  
den skillnadsfrekvens som är nödvändig för att systemet skall kunna leverera  
35 en spänning med rätt frekvens till kraftnätet vid varierande varvtal hos  
hydromaskinen. I praktiken innebär detta att om hydromaskinen roterar med  
sitt synkrona varvtal kommer omformaren att vara stillastående, dvs fungera  
som en stationär transformator. Beroende på aktuellt varvtal hos  
hydromaskinen kommer således omformarens rotor att behöva en drivkälla  
40 M/G 15 i form av en motor eller generator med vs-vs-omvandlare 16. Det  
kan således konstateras att omformaren 11 måste dimensioneras för i stort  
sett samma effekt som hydrogeneratoren och att släpringarna måste kunna

- 5 överföra full effekt. Omformaren 11 roterar med den låga skillnads-  
frekvensen vilket innebär att omformaren måste ha forcerad kylning med  
stor effektförlust.

10 Spänningsregleringen hos en hydrogenerator 1 enligt US-patentskriften sker  
genom ovan nämnda likströmsmagnetisering. Den roterande omformaren 11  
har i sin rotorlindning 12 och i sin statorlindning 13 läckreaktanser som  
förbrukar reaktiv effekt och orsakar spänningsfall. Dessa kan kompenseras  
med ökad likströmsmagnetisering i generatorns rotorlindning 3 eller kan,  
15 enligt den med ovan anförda US-patentet associerade ansökan EP 0749190  
A2, kompenseras av seriekondensatorer. Av EP-ansökan framgår även att  
en typisk märkspänning för släpringarna är 15 kV. Märkströmmen för en  
sådan 100 MVA-maskin blir således ca 4 kA och för en 300 MVA-maskin  
blir den 12 kA. Ett väsentligt problem med sådana maskiner blir följaktligen  
att utföra, nyttja och underhålla släpringar för dessa spänningar och  
20 strömmar.

I ABB Review 3/1996, pp 33 - 38 redovisas en anläggning där "ABB  
Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of  
hydropower plant". Optimeringen sker genom att man låter turbin och  
25 elgenerator gå med variabelt varvtal. För att ändå kunna ansluta  
elgeneratorm till ett kraftnät med given och i huvudsak fast frekvens anpassas  
elgeneratorns frekvens till nätfrekvens med hjälp av en s k  
under/översynkron strömriktarkaskad. För att lättare kunna jämföra denna  
generatordrift med övriga redovisade utföranden har den aktuella delen av  
30 figur 4 i nämnda ABB-publikation återgivits i figur 6 och ritats med samma  
figursymboler och hänvisningssiffror som i figurerna 2 - 4 i rubricerade  
patentskrift. Här finns således en vattendriven turbin 6 med en elgenerator 1  
(G2) för alstring av hydroelektrisk effekt. Elgeneratorm 1 innefattar en axel  
2 som är anordnad med hydrogeneratorns rotor med lindning 3. I figur 6  
35 visas även elgeneratorms statorlindning 7. Frekvensanpassningen till aktuell  
nätfrekvens sker med hjälp av den under/översynkrona strömriktarkaskaden  
17 (CC), som i själva verket är en sk cykloconverter/frekvensomvandlare.  
Matningen till dess nätsida sker via en transformator 18 (TR) och den  
aktuella skillnadsfrekvensen matas in till elgeneratorms rotorlindning 3 via  
40 släpringar 19. Den således med rätt frekvens alstrade spänningen matas  
sedan via en transformator 8 till kraftnätet. En sådan frekvensanpassning  
hos en elgenerator som drivs av ett variabelt varvtal är en s k Static  
Scherbiusdrift, se nedan under redovisningen av teknikens ståndpunkt vad  
avser motordrifter.

- 5 För att kontinuerligt och under olika driftförutsättningar kunna åstadkomma rätt skillnadsfrekvens krävs ett frekvensreglersystem. I det utföringsexempel av teknikens ståndpunkt som visas i figur 5 skall frekvensreglersystemet se till att omformarens rotor roterar med rätt varvtal med hjälp av en styrsignal 16a till M/G:s styrdon och i det exempel som visas i figur 6 skall
- 10 frekvensreglersystemet ge rätt styrsignal 17a till vs-vs-omvandlaren 17. Frekvensreglersystemen ligger dock utanför ramen för denna uppfinning och kommer således ej att närmare beskrivas.

- 15 För anslutning till ett kraftnät krävs förutom någon form av frekvensreglering även en spänningsreglering till amplitud och fasvinkel. Spänningsreglersystemen ligger på samma sätt som ovan utanför ramen för denna uppfinning.

- 20 Beroende på aktuellt reglerområde både vad frekvens och spänning beträffar kommer vid släpningade växelströmsmaskiner effekt att cirkulera internt via den krets som innefattar stator, rotor, släpningar, transformator och strömriktare. Effektdimensioneringen av dessa delar ligger också utanför ramen för denna uppfinning även om en relativ jämförelse mellan olika utföringsformer kommer att visas under redogörelsen för uppfinningen för
- 25 att påvisa de fördelar som utföranden enligt uppfinningen besitter relativt teknikens ståndpunkt.

- I SU 1746474 A1 redovisas en "Asynchronised Synchronous Machine having Reversive Excitation System". Detta är en elektrisk maskin med
- 30 konventionell trefas statorlindning kopplad till ett kraftnät. Rotorn är försedd med galvaniskt skilda faslindningar. Var och en av dessa är kopplade till var sin medroterande dubbelströmriktare. Dessa är utförda med tyristorer och matas från en medroterande magnetiseringsmatare. Strömriktarna är således maskinkommuterade från magnetiseringsmataren och är anordnade så att de
- 35 kan förse respektive rotorlindning med växelspanning med en frekvens som motsvarar maskinens eftersläpningsfrekvens. Det är uppenbart att det finns problem vid byte av strömriktning i rotorlindningarna. För att säkerställa övergången och för att undvika stora kortslutningsströmmar då magnetiseringsströmmen skall byta riktning har man fått tillgripa ett
- 40 speciellt kopplingsarrangemang för anslutningen av dubbelströmriktarna. Detta består i att varje rotorlindning är försedd med ett extra uttag ett antal lindningsvarv från varje änduttag.

- 5 För att vid varierande vindhastighet kunna anpassa frekvensen hos ett vindkraftverks elgenerator till ett anslutet kraftnäts frekvens finns ett borstlöst system, OPTI-SLIP®, framtagen av Vestas Danish Wind Technol. A/S, Danmark, beskrivet i en artikel "Semi-variable speed operation-a compromise?", presenterad vid Proceedings of 17 Annual Conference,  
 10 British Wind Energy Association. 19-21 July 1995, Warwick, UK. Principen för regleringen är baserad på den välkända metoden med förlustreglering med hjälp av varierande yttre rotormotstånd anslutna via släpringar till elgeneratorns rotorlindning. Till skillnad från den välkända släpringsmetoden är OPTI-SLIP®-anläggningen anordnad med en  
 15 medroterande vs-ls-ls-omriktare och medroterande fasta rotormotstånd direkt anslutna till rotorlindningen. Vs-ls-omvandlingen är utförd med en diodlikriktare, som i sin tur kortsluts av en ls-ls-omvandlare. Vindkraftverkets hastighetsreglering sker via en inre rotorströmsreglering. Den med regleringen förknippade förlusteffekten utvecklas således i det  
 20 medroterande rotormotståndet för att sedan avges till omgivande luft. Av konferensuppsatsen framgår det att varvtalet kan vara upp till 4 % över det synkrona påföljden att lika många procent effekt förloras som förluster i rotorkretsen.

- 25 Uppkörning av elgeneratorer till aktuellt reglerområde sker på samma sätt som för konstantvarviga generatorer, dvs att turbinen accelererar elgeneratoren till området för möjlig synkronisering.

- Den närmast följande delen av teknikens ståndpunkt behandlar  
 30 växelströmsmaskinernas användning som motor med varierbart varvtalet med ett mer eller mindre begränsat varvtalsreglerområde omkring ett av växelströmsnätets frekvens och huvudmaskinens poltal enligt ekvation (1) bestämt synkront varvtalet.

- 35 Varvtalsstyrda/-reglerade motordrifter har funnits i ca 100 år. De allra första var s k Ward-Leonard-drifter, dvs likströmsmotordrifter. Något senare tillkom olika motordrifter baserade på växelströmsmaskiner. Dessa motordrifter är ofta benämnda efter sina respektive uppfinnare Kramer, Scherbius, Schrage m fl. Kännetecknande för dessa maskiner är att de är  
 40 försedda med lindad rotor samt borstar och släpringar eller kommutator. Typiskt är också att de är anordnade för att föra tillbaka elektrisk effekt från de roterande delarna till stillastående anläggningsdelar som t ex rotor-motstånd eller att de är reglerade med maskiner som ställdon.

- 5 Efter strömriktarnas tillkomst har intresset för varvtalsreglerade motordrifter med växelströmsmaskiner rent allmänt fått förnyad aktualitet. De senaste årens forskning har fokuserats på s k "borstlösa växelströmsmaskiners" varvtalsreglering via i huvudsak två principer, nämligen genom att variera statorfrekvensen med vs-vs-omvandlare, s k statoromriktare för full effekt, 10 och under de senaste decennierna ofta genom s k fältvektorreglering, dvs uppdelning i flödes- och momentbildande strömmar.

- Tillkomsten av strömriktare har även medfört att de klassiska Kramer- och Scherbiusdrifterna, vilka följer ekvation (2) ovan, har fått förnyad aktualitet 15 och benämns numera ofta som "Static Kramer" respektive "Static Scherbius". Den förnyade aktualiteten avser främst motordrifter med effekter i MW-klassen. Det är dessa motordrifter som närmast är att betrakta som teknikens ståndpunkt relativt rubricerade uppfinning. Dessa finns beskrivna i ett stort antal skrifter, bl a kortfattad i IEE Proc, Vol. 131, Pt. A, 20 No. 7, September 1984, pp 535-536, "Electrical variable-speed drives", av B. L. Jones m fl.

- En statisk Kramerdrift omtalas oftast som en undersynkron strömriktarkaskad och har en principiell koppling enligt figur 7. Den 25 horisontalaxlade motorns statorlindning 20 är kopplad till ett kraftnät. Rotorlindningen 21 är via släpringar 22 kopplad till en likriktare 23, vars spänning blir proportionell mot eftersläpningen. Denna spänning kopplas mot av spänningen från en till samma kraftnät via en transformator 24 kopplad växelriktare 25. Växelriktarens spänning är en trigonometrisk 30 funktion av dess styrvinkel och bestämmer på detta sätt motorns varvtal. Hos en statisk Kramerdrift blir på detta sätt eftersläpningeffekten matad tillbaka till nätet genom frekvensomvandling i två steg via ett likströmsmellanled.

- 35 När det gäller en drift enligt figur 7 kan effekt överföras endast i en riktning via likriktare men i båda riktningarna om likriktaren 23 utförs som strömriktare med tyristorer. För att ändra rotationsriktningen behöver motoranslutningens fasföljd skiftas.

- 40 En statisk Kramerdrift kan karakteriseras som en strömstyrd motordrift.

En statisk Scherbiusdrift framgår av figur 8. Motorns statorlindning 20 är på samma sätt som i figur 7 kopplad till ett kraftnät. Rotorlindningen 21 är via släpringar 22 kopplad till en, till kraftnätet via en transformator 24 ansluten,

- 5 cykloconverter/ frekvensomvandlare 26. Det specifika för en Scherbiusdrift  
är att varvtalet styrs via rotoranslutningen med cykloconverters spänning  
vars amplitud, fas och frekvens kan ändras oberoende av varandra. För  
styrningen behövs en återkoppling från motorn för att upprätthålla rätt  
10 frekvens samt amplitudkvoten och fasförhållandet mellan rotorspänning och  
styrspänning.

En fördel hos Scherbiusdriften relativt Kramerdriften är att  
frekvensomvandlaren kan förse maskinen med en rotorström även vid  
synkron drift vilket medför att driften utan extra elektronik kan övergå från  
15 undersynkron till översynkron drift. Dessutom kan en Scherbiusdrift,  
eftersom frekvensomvandlaren är regenerativ, bromsa både vid under- och  
översynkron hastighet. Den kan också kontinuerligt arbeta vid synkron drift  
utan att krafthalvledarna överbelastas. Släpringarna kan dock bli  
osymmetriskt belastade med viss risk för överhettning när driften är synkron.

20 En statisk Scherbiusdrift kan karakteriseras som en frekvens- och  
spänningsstyrd motordrift.

- I Hitachi Review Vol. 44 (1995), No. 1, pp 55 - 62 beskrivs en "400-MW  
25 Adjustable-Speed Pumped-Storage Hydraulic Power Plant" som baseras på  
Scherbius-principen där den vertikalaxlade varvtalsreglerade växel-  
strömsmaskinen används som pumphotor nattetid och som elgenerator  
dagtid. Bortsett från axelns monteringsriktning är växelströmsmaskinens  
principiella utförande, koppling och funktionella beskrivning således den  
30 samma som för figurerna 6 och 8. Intressanta siffror i sammanhanget är att i  
generatordrift är märkeffekten 395 MVA vid ett varvtalsområde på  
330 - 354 r/min och vid motordrift är märkeffekten 380 MW vid ett  
varvtalsreglerområde 330 - 390 r/min. Den behövliga cykloconverters  
effekt för dessa reglerområden är 72 MVA, dvs den ligger mellan 18 och 22  
35 % av respektive märkeffekter.

De redovisade utförandena med släpringar och strömriktare både vad gäller  
elgenerator- och motordrift är behäftade med vissa nackdelar/problem som  
uppfinningen avser att i stor utsträckning eliminera respektive reducera.

40 Den största nackdelen med dessa drifter, och som förorsakar flest problem  
och fel, är släpringarna och deras anslutningar, borstar m m. Dessa delar av  
en växelströmsdrift är de som har kortast livslängd och kräver mest  
underhåll, speciellt som de skall överföra väsentliga effekter, jämför t ex

- 5 nämnda utförande enligt US 5,742,515 där hela maskineffekten skall överföras via släpringarna.

Vid släpringade växelströmsmaskindrifter cirkulerar effekt internt både i statorkretsen, rotorkretsen och luftgapet samt via den yttre transformatorn  
 10 och vs-vs-omvandlaren. Den cirkulerande effekten kan vara både aktiv och reaktiv. Den reaktiva effekten förbrukas internt i transformatorn, i strömriktaren samt i växelströmsmaskinens rotor och stator. Detta ökar typeffekten för den elektromagnetiska kretsen, dvs den dimensionerande produkten av märkspänning vid tomgång och märkström vid full last.  
 15 Samtidigt innebär detta också att strömriktarnas typeffekt blir större än vad som behövs pga den cirkulerande reaktiva effekten.

Växelströmsmotordrifterna har f n av olika skäl en praktisk övre effektgräns på ca 25 MW. Detta beror huvudsakligen på de problem som uppstår i  
 20 samband med start och acceleration av motordrifterna på relativt svaga kraftnät. Om man skulle starta en synkronmaskin med direktstart, dvs med direkt inkoppling till kraftnätet utan att på något sätt försöka reducera rotorströmmarna, skulle startströmmen kunna uppgå till 3 – 6 gånger märkström och startförlusterna kommer huvudsakligen att utvecklas i de  
 25 roterande delarna där de under start-/accelerationsförloppet lagras adiabatiskt. För att start skall kunna ske på ett mer kontrollerad sätt tillgrips olika förfaranden som serie/parallell koppling av statorlindningarna, med hjälp av starttransformator eller med en förkopplad reaktor eller motstånd. Start av släpringade växelströmsmaskiner kan ske med full statorspänning  
 30 med till rotorlindningen via släpringarna anslutet rotormotstånd  $R_s$  som succesivt minskas när maskinen går i gång. En sådan startanordning framgår av figur 9.

Bromsning eller retardation av växelströmsmaskiner från reglerområdet runt  
 35 synkront varvtal till stillastående enligt teknikens standpunkt sker på ett för fackmannen välkänt sätt. Bromsning är ett transient förlopp och är på samma sätt som start associerat med förändringar i det roterande systemets rörelseenergi. Den enklaste elektriska metoden att bromsa är den s k motströmsbromsningen, som sker genom att byta två faser i den till  
 40 statorlindningen anslutna växelspänningen. Den med det transienta förloppet associerade förändringen av rörelseenergin orsakar förlustenergi i rotorkretsen, som därför klassiskt utförs med släpringar och yttre rotormotstånd för att föra bort förlustenergin från växelströmsmaskinens inre på samma sätt som vid start.

## 5 REDOGÖRELSE FÖR UPPFINNINGEN, FÖRDELAR

Som angivits inledningsvis består uppfinningen av en elektrisk roterande växelströmsmaskin som i sitt basutförande innefattar en huvudmaskin och en reglermaskin med gemensam mekanisk axel och en med axeln roterande strömriktare. Uppfinningen innefattar även ett förfarande vid användning av den medroterande strömriktaren.

Kännetecknande för huvudmaskinen är att den är utformad med vs-lindningar i både stator och rotor samt att den kan arbeta både som elgenerator och motor.

Reglermaskinen har flera funktioner. Den skall förse huvudmaskinens rotorlindning med reglereffekt/-frekvens för aktuellt reglerområde och den skall också kunna fungera som startmotor för konstantfrekvensmaskinen eller kunna överföra huvudmaskinens startförluster till yttre motstånd.

Strömriktaren har också flera funktioner. Dess huvuduppgift är att under drift fungera som en vs-vs-omvandlare enligt tidigare given definition. Under start skall den kunna fungera som en vs-flerfaskopplare eller som en vs-fasvinkel/spänningsregulator eller som en vs-kortslutningskopplare för reglermaskinens rotorlindning. Vid kontrollerad bromsning och/eller stopp skall strömriktaren kunna fungera som en vs-fasvinkel/spänningsregulator eller som en vs-flerfaskopplare. Uppfinningen innefattar även ett förfarande vid användning av den medroterande strömriktaren i enlighet med ovanstående.

Anläggningsutförandena då maskinen arbetar som elgenerator respektive motor skiljer sig dock något främst vad avser märkeffekter, märkspänningar och startmetoder. I vissa sammanhang kan dock maskinen komma till användning både som elgenerator och motor.

Inledningsvis behandlar redogörelsen för uppfinningen utformningen av huvudmaskinens statorlindning, som i stora drag är gemensam för maskinen både som elgenerator och motor. Sedan följer en beskrivning av maskinen då den kommer till användning som elgenerator med variabelt varvtal och då den används som motor med varierande varvtal. Därefter redogörs i stora drag för reglermaskinens samt även i viss utsträckning vs-vs-omvandlarens utformning. Avslutningsvis anges de fördelar som en maskin enligt uppfinningen besitter relativt teknikens ståndpunkt.



5

Det har i generella ordalag anförts ovan att huvudmaskinens statorlindning ansluts till ett transmissions- eller distributionskraftnät med mellan- eller högspänning. Anslutningen kan som anförts på bifogade figurer vara transformatorlös eller via krafttransformatorer. Anslutningen kan också ske  
10 mot strömriktare för frekvensomvandling, för faskompensering, för filtrering av övertoner osv.

För direktanslutning till ett högspänningsnät är statorlindningen hos en maskin enligt uppfinningen lindad med en högspänningskabel. En  
15 föredragen utföringsform av kabeln innefattar en strömförande ledare som består av transponerade, både oisolerade och isolerade, kardeler. Runt ledaren finns ett inre halvledande skikt som är omgivet av minst ett extruderat isolationslager vilket i sin tur är omgivet av ett yttre halvledande skikt. För att undvika inducerade strömmar och därmed förknippade  
20 förluster i det yttre halvledande skiktet är detta delat i ett antal avskurna delar. Var och en av dessa avskurna delar är sedan ansluten till jord varvid det yttre halvledande skiktet kommer att befinna sig på jordpotential eller åtminstone nära jordpotential. Detta innebär att inga stora slumpvis fördelade, med ledargeometrin varierande elektriska fältkoncentrationer kan  
25 uppstå hos maskinens statorlindning. En fyligare beskrivning av en sådan kabel och lindning samt de fördelar som en sådan kabel och lindning medger i roterande maskiner ges i WO 97/45919.

Som angivits ovan skall redogörelsen för uppfinningen först beskriva hur  
30 maskinen kommer till användning som en elgenerator med varierande varvtal. Ett utföringsexempel av basutförandet visas i figur 10 som vad genererad spänning beträffar avser en konventionell elgenerator, dvs en elgenerator avsedd för spänningar upp till 25 kV. För att enkelt kunna jämföra uppfinningen med den redovisade teknikens ståndpunkt har figur 10  
35 i möjligaste mån samma figursymboler och hänvisningssiffror som tidigare redovisade figurer. Det finns således en huvudmaskin/elgenerator 1, en på en gemensam axel anordnad reglermaskin 27 och en på axeln monterad strömriktare 28 i form av en vs-vs-omvandlare. Av figur 10 framgår i övrigt att reglermaskinens växelströmsrotorlindning 29 är ansluten till vs-vs-  
40 omvandlarens "nätsida" och att dess utgång är ansluten till elgeneratorns växelströmsrotorlindning 3. Reglermaskinens statorlindning 30 kan på samma sätt som för tidigare omtalade borstlösa matare vara utformad med utpräglade poler. Som det framgår av den följande redovisningen kan även annan utformning komma till användning. Huvudmaskinen/elgeneratoren och

- 5 reglermaskinen drivs på tidigare omtalat sätt via en turbin 6. Elgeneratorns i statorlindningen 7 genererade spänning ansluts som ovan via en step-up-transformator 8 till ett högspänningskraftnät.

- 10 Principen för frekvensregleringen vid varierande varvtal på drivanordningen är densamma som tidigare redovisats, dvs att man tillför elgeneratorns växelströmsrotorlindning 3 en spänning med den skillnadsfrekvens som behövs för att vid aktuellt varvtal erhålla den önskade frekvensen hos den genererade statorspänningen. Frekvensreglersystemets styrsignal 28a till den roterande vs-vs-omvandlaren kan skapas på olika sätt som ligger utanför  
15 ramen för denna uppfinning. Detsamma gäller systemets spänningsreglering, vad avser amplitud och fasvinkel.

- Det skall uppmärksammas att då elgeneratorn drivs med ett varvtal som, med givet pötagal, motsvarar synkronisering till kraftnätets frekvens, så  
20 kommer vs-vs-omvandlarens anslutning till rotorlindningen att ske med frekvensen noll, dvs med likström.

- Till skillnad från teknikens ståndpunkt med släpringad överföring av effekt/skillnadsfrekvens till rotorlindningen och till skillnad från den  
25 specialkoppling av rotorlindningen med galvaniskt skilda lindningar med extra uttag som behövs med den maskinkommuterade dubbelströmriktaren som redovisas i SU 1746474 A1, sker nu enligt uppfinningen överföring av effekt/skillnadsfrekvens till en konventionell rotorlindning med en självkommuterad dubbelströmriktare som i en föredragen utföringsform  
30 består av en matrisomvandlare. Eftersom det nu är fråga om effektöverföring till/från kraftnätet måste reglermaskin och strömriktare dimensioneras för det aktuella reglerområdet både vad moment och varvtal beträffar samt även beträffande s k kommuteringsöverlappningar pga "svagt nät"-karaktär hos de roterande lindningarna. Som exempel på sådan dimensionering anges enligt  
35 ovan cycloconverters effekt relativt märkeffekten i Hitachifallet. För att illustrera detta har, till skillnad från figur 2, 3 m fl där mataren enbart skall förse elgeneratorn med likströmsmagnetiseringseffekt, reglermaskinen 27 ritats mera proportionellt korrekt relativt elgeneratorns effekt.

- 40 Problem i samband med strömriktares kommutering kan reduceras på olika sätt. I ABB Review 2/97 pp 25-33 beskrivs ett sätt med "Capacitor commuted convertors for HVDC-system". Artikeln beskriver hur kommuteringsmarginalen förbättras och hur reaktiva effektbehovet sjunker med seriekondensatorer i vs-anslutningen, dvs mellan den nätkommuterade

- 5 strömriktaren och dess transformator, när strömriktaren arbetar i växelriktardrift. En motsvarande teknik kommer till användning i samband med beskrivningen och utföringsformer av den i uppfinningen integrerade vs-vs-omvandlaren.
- 10 Konstantfrekvensmaskinen med variabelt varvtal enligt uppfinningen kan självfallet utformas för anpassning till olika genererande applikationsalternativ. Detta gäller speciellt för både huvudmaskinens och reglermaskinens lindningsutföranden och därmed även för vs-vs-omvandlarens utformning. Som exempel på alternativa utföringsformer när det gäller
- 15 statorlindningen hos elgeneratoren kan den också, förutom den i figur 10 visade utföringsformen för "konventionell" högspänningsnivå vad elgeneratorer beträffar, utformas som den i WO 97/45919 redovisade elgeneratoren för än högre spänningar enligt figur 11a som är en motsvarighet till figur 3. Figur 11b visar en axiell ändvy av en sektor/podelning hos en
- 20 huvudmaskin enligt uppfinningen och kommer att närmare redovisas under beskrivningen av utföringsformer. Motsvarigheten till figur 4, dvs där elgeneratoren är utformad som en högspänningsgenerator enligt WO 97/45907 med 2x3-fas statorlindningar för matning av en HVDC-anläggning med 12-pulsspänning, är också en högst aktuell utföringsform.
- 25 Uppkörning/start av konstantfrekvensmaskinen till aktuellt reglerområde för drift som elgenerator sker genom att turbinen accelererar huvudmaskin och reglermaskin till dess att maskinen själv kan överta regleringen.
- 30 En växelströmsmaskin enligt uppfinningen har också ett stort applikationsområde när det gäller motordrifter med varierande varvtal. Ett basutförande när det gäller motordrifter skall beskrivas med utgångspunkt från figur 12.
- 35 På samma sätt som angivits för utföringsexemplet med basutförandet av elgeneratoren skall även här, för jämförelse av uppfinningen med den redovisade teknikens ståndpunkt, i möjligaste mån samma figursymboler och hänvisningssiffror komma till användning som i tidigare redovisade figurer vad avser motordrifter, dvs figurerna 7 och 8. Det finns således enligt
- 40 figur 12 en huvudmaskin/elmotor 1 med en statorlindning 20 och en rotorlindning 21, en på en gemensam axel anordnad regleraskin 27 och en strömriktare 28 i form av en vs-vs-omvandlare. Reglermaskinen är försedd med en rotorlindning 29 och en statorlindning 30. Av figur 12 framgår i övrigt att reglermaskinens rotorlindning 29 är ansluten till

- 5 vs-vs-omvandlaren "nätsida" och att dess utgång är ansluten till  
huvudmaskinens/elmotorns växelströms rotorlindning 21. Reglermaskinens  
statorlindning 30 kan på samma sätt som tidigare omtalade borstlösa matare  
vara utformad med utpräglade poler men även här kan andra utföringsformer  
10 förekomma. Elmotorn och reglermaskinen driver gemensamt den (icke  
visade) mekaniska lasten.

- Principen för att variera varvtalet hos motordrifter vid växelströmsmatning  
med "konstant" nätfrekvens är densamma som tidigare redovisats för  
elgeneratorer, dvs att enligt figur 12 huvudmaskinens växelströms-  
15 rotorlindning 21 tillförs en spänning med den skillnadsfrekvens som behövs  
för att de av strömmarna i statorlindningen 20 och rotorlindningen 19  
skapade mmk- och flödesvågorna skall rotera synkront i elmotorns 1 luftgap.  
Varvtals-/frekvensreglersystemets styrsignal 28a kan skapas på olika sätt.  
Det beror på krav på dynamik, effektfaktor, nätspänningens nivå relativt dess  
20 nominella osv. På samma sätt som för synkron drift av elgeneratorn  
redovisats ovan får strömmen i elmotorns 1 rotorlindning 21 frekvensen noll  
vid synkron drift, dvs det blir åter ett specialfall med likström i  
huvudmaskinens växelströms rotorlindning.

- 25 Vid redogörelsen för uppfinningen både vad gäller generator- och motordrift  
har angivits att reglermaskinens rotorlindning skall vara en  
växelströmslindning och att statorlindningen kan vara utformad med  
utpräglade poler men att andra utföringsformer kan, beroende på olika  
tillämpningar, bli aktuella. Den närmast följande delen av redogörelsen  
30 beskriver alternativa utföringsformer.

- Reglermaskinen skapar ett lokalt växelströmsnät till vilket endast  
vs-vs-omvandlaren är ansluten. Dess poltal kan således väljas relativt fritt.  
För att hålla dess fysiska dimensioner så små som möjligt för en given  
35 varvtalsvariation utförs reglermaskinen företrädesvis med fler poler än  
huvudmaskinen.

- Utformningen med utpräglade poler kan också ske på olika sätt. Den  
föredragna utföringsformen består av "utpräglade poler" med en  
40 likströmslindning. Därvid skapas ett stillastående luftgapsflöde i regler-  
maskinen som medger en anläggningstekniskt attraktiv styrmöjlighet genom  
att variera luftgapsflödets storlek via likströmmens värde. Utföringsformen  
utpräglade poler i reglermaskinens stator innefattar även att luftgapsflödet  
skapas av permanenta magneter, vilket dock innebär ett i stort sett konstant

- 5 luftgapsflöde. Utformningen med utpräglade poler hos reglermaskinens stator är huvudsakligen aktuell då uppfinningen kommer till användning vid olika generatordrifter.

- Reglermaskinens statorlindning kan också utformas som en  
10 växelströmslindning varvid det skapas ett roterande luftgapsflöde i reglermaskinen. Ett sådant utförande medger främst tillförsel av magnetiseringseffekt under drift, dock kombinerad med viss in-/utmatning av axeleffekt. Denna kan elimineras genom att mata in likström i en del av  
15 eller genom omkoppling av växelströmslindningen. En annan stor fördel med en växelströmslindning i statorn är att startförutsättningarna förbättras väsentligt då maskinen enligt uppfinningen används som motor.

- De vs-vs-omvandlare som enligt teknikens ståndpunkt används i samband med varvvalsreglering via matande varierande frekvens har en konstant  
20 infrekvens bestämd av elkraftnätet. En maskin enligt uppfinningen ställer högre krav på vs-vs-omvandlaren. Detta beror på att vs-vs-omvandlarens inspänning/infrekvens, som alstras av reglermaskinens rotorlindning, varierar och är, för given maskindesign och elkraftnät beroende av och direkt proportionell mot axelns variabla/varierande varvtal. Dessutom skall vs-vs-  
25 omvandlarens utspänning/utfrekvens till huvudmaskinens rotorlindning vad frekvens beträffar vara proportionell mot varvtalsskillnaden mellan huvudmaskinens synkrona och aktuella varvtal. Detta medför att kvoten mellan vs-vs-omvandlarens in- och utfrekvens kommer att variera.

- 30 Den i uppfinningen integrerande vs-vs-omvandlarens utformning och ingående komponenter kommer att närmare redovisas i beskrivningen av utföringsformer. Generellt gäller i övrigt att vs-vs-omvandlaren kan vara utförd som en matrisomvandlare eller som en cyklokonverter, dvs en spänningsstyv direktomvandlare med antiparallellkopplade tyristorbryggor.  
35 Vs-vs-omvandlaren kan också utföras med likspännings- eller likströmsmellanled. Den skall dimensioneras så att den tål största uppträdande tomgångsspänning och största möjliga belastningsström i rotorlindningarna.

5 Växelströmsmaskindrifter enligt uppfinningen har ett väsentligt antal fördelar jämfört med motsvarande drifter utformade enligt teknikens ståndpunkt:

- Styrning/reglering av växelströmsmaskinen sker borstlöst.
- 10 • Eftersom det vid dessa borstlösa växelströmsmaskiner inte cirkulerar effekt runt via statorkretsen innebär detta ungefär en halvering av nödvändiga strömriktareffekter.
- 15 • En växelströmsmaskin enligt uppfinningen kan både som motor och generator komma till användning för generering av reaktiv effekt till kraftnätet eller åtminstone inte dra någon reaktiv effekt från maskinen.
- Kraftelektroniska strömriktare minskar huvudkretsarnas förluster och  
20 fysiska storlek.
- Eftersom vare sig aktiv eller reaktiv cirkulerande effekt belastar statorns lindning kommer också förlusterna att väsentligt minska relativt motsvarande för teknikens ståndpunkt.
- 25 • Både huvudmaskinens och reglermaskinens rotorlindningar kan utföras med lägre och därmed billigare spänningsnivåer, eftersom det inte längre finns några begränsande, yttre kriterier från släpringar, utbredda skenstråk och kablage.
- 30 • Övertoner i strömriktarkretsarna stannar väsentligen inne i den roterande maskinen och fortplantas således ej till kraftnätet.
- Maskinen kan utformas för en, två eller flera högeffektsanslutningar till  
35 matande nät.

För att ytterligare redovisa fördelarna med en konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt uppfinningen visas i följande tabell en relativ effektjämförelse med utgångspunkt från en given skenbar märkeffekt  
40  $S_n$  för de redovisade utföringsformerna. Jämförelsen avser summaeffekt för de roterande maskinerna, ROT, summaeffekt för ingående transformatorer, TRAFO, summaeffekt för ingående strömriktare, SR, summan av via

- 5 släpringar överförd effekt, SL samt uteffekt, UE. (T.S.) respektive (U.F.) betyder att figuren tillhör teknikens ståndpunkt eller uppfinningen.

	Maskin enligt	ROT	TRAFO	SR	SL	UE
	Figur 2 (T.S.)	$S_n$	$S_n$	$0,05 S_n$	0	$S_n$
	Figur 3 (T.S.)	$S_n$	0	$0,05 S_n$	0	$S_n$
10	Figur 5 (T.S.)	$2,2 S_n$	$S_n$	$0,2 S_n$	$1,15 S_n$	$1,1 S_n$
	Figur 6 (T.S.)	$1,3 S_n$	$1,4 S_n$	$0,4 S_n$	$0,4 S_n$	$1,1 S_n$
	Figur 9 (U.F.)	$1,3 S_n$	$S_n$	$0,3 S_n$	0	$1,1 S_n$
	Figur 10 (U.F.)	$1,3 S_n$	0	$0,3 S_n$	0	$1,1 S_n$

- 15 Maskin enligt figur 2:

Samtliga "större" tillverkare av elgeneratorer kan tillverka konstantvarvsmaskiner med fulleffekts step-up-transformator med borstlös matare. I en anläggning enligt figuren utförs elkraftgeneratorm 1 och step-up-transformatorn 8 för samma skenbara märkeffekt  $S_n$ .

- 20 Standardkonceptet för en anläggning är att för det borstlösa utförandet använda en medroterande matare med strömriktare/vs-ls-omvandlare 5 för att mata fältlindningen 3 i rotorn. Strömriktarens typeffekt blir till viss del beroende av spänningsregleringens dynamiska krav. Typiska värden är dock att den dimensioneras för 5 % av elgeneratorns effekt. Maskinen har inga  
25 släpringar för överföring av likströmsmagnetiseringen till fältlindningen.

Maskin enligt figur 3:

- Detta är en maskin enligt tidigare redovisade WO 97/45919, dvs en elgenerator 1 för högspänning där anläggningen ej behöver någon step-up-transformator. Den medroterande strömriktarens typeffekt blir som ovan,  
30 dvs ca 5 % av den skenbara märkeffekten. Magnetiseringen kan ske utan släpringar.

Maskin(-er) enligt figur 5:

- 35 En uppskattning av summan av den skenbara märkeffekten för de roterande maskinerna ger vid handen att den blir ca  $2,2 S_n$ . Utan att närmare specificera underlaget för denna bedömning kan konstateras att eftersom maskinen/omformaren 11 skall ha märkeffekten  $S_n$ , likväl som transformatorn 8, så måste maskin 1 dimensioneras för samma effekt plus  
40 den reaktiva effekt som maskin 11 förbrukar. Summan av de roterande

- 5 maskinernas effekt måste dessutom innefatta den effekt som går åt för att driva maskin 15, dvs omvandlarens drivkälla.

Summa strömriktareffekt för vs-vs-omvandlaren 16 och för likströmsmagnetisering av maskin 1 uppskattas till ca  $0,2 \cdot S_n$ .

10

Total effekt genom släpringarna blir den från maskin 1 till maskin 11 överförda skenbara effekten som uppskattas till ca  $1,15 \cdot S_n$  utgående från en kortslutningsreaktans hos maskin 11 på 0,15 pu. Serie-kondensatorerna som nämns i EP 0749190 får också värdet 0,15 pu. Som tidigare redovisats ställs

15

det mycket höga krav på släpringarnas effektöverföringsförmåga.

Maskin enligt figur 6:

Som tidigare redovisats är detta ett system baserat på Scherbius-kaskaden där den roterande elmaskinen/elgenerator 1 antas vara utförd med

20

släpringar 19 till kaskaden. Vs-vs-omvandlaren 17, dvs strömriktaren i kaskaden, dimensioneras för aktuellt reglerområde samt för den reaktiva effekt som den förbrukar. Den installerade märkeffekten för strömriktaren kan således uppskattas till ca  $0,4 \cdot S_n$  vilket också motsvarar den totala effekten genom släpringarna. Den roterande maskinens skenbara märkeffekt kommer följaktligen att bli ca  $1,3 \cdot S_n$  och den totalt installerade märkeffekten för transformatorerna ca  $1,4 \cdot S_n$ .

25

Maskiner enligt figurerna 10, 11a och 11b :

Dessa figurer representerar en maskin enligt rubricerade uppfinning, dvs en "Konstantfrekvensmaskin med variabelt/varierbart varvtal". Sammanfattningsvis innefattar maskinen en första elmaskin 1 kallad huvudmaskin och en andra elmaskin 27 kallad reglermaskin med en gemensam mekanisk axel 2 och en medroterande strömriktare/vs-vs-omvandlare 28.

30

Huvudmaskinen 1 kan enligt figur 10 utföras med för elgeneratorer

35

"konventionell" högspänning, dvs upp till 25 kV och step-up-transformator 8 eller den kan enligt figur 11a utföras med högspänningslindning varvid step-up-transformatorn elimineras. Eftersom det inte internt cirkulerar reaktiv effekt via huvudmaskinens stator blir typeffekten för

vs-vs-omvandlaren för samma reglerområde som för maskinen enligt figur 6

40

mindre, uppskattningsvis ca  $0,3 \cdot S_n$ . Reglermaskinens märkeffekt blir följaktligen också  $0,3 \cdot S_n$  och den roterande maskinens totala skenbara märkeffekt  $1,3 \cdot S_n$ . Transformatorns 8 märkeffekt i figur 10 blir  $1,0 \cdot S_n$ . Maskiner enligt uppfinningen innefattar således inga släpringar.



5 En konstantfrekvensmaskin enligt uppfinningen har till skillnad från de  
under teknikens ståndpunkt redovisade utföringsformerna en fördel som  
innebär att start- och accelerationsförutsättningarna väsentligt förbättras. Det  
har tidigare redovisats att reglermaskinens statorlindning kan utformas som  
10 en växelströmslindning för att, t ex via en hjälplindning i huvudmaskinens  
stator, medge tillförsel av magnetiseringseffekt för reglermaskinen under  
drift. Det antyds också i det sammanhanget att en växelströmslindning i  
reglermaskinens stator förbättrar startförutsättningarna då konstantfrekvens-  
maskinen används som motor. Om reglermaskinens statorlindning utformas  
15 som en trefaslindning kan under startförloppet yttre varierbart motstånd  
anslutas till lindningens anslutningar för att styra startströmmens storlek och  
till huvudsakligen resistiv fasvinkel samt för att föra bort med startförloppet  
förknippade förluster hos huvudmaskinen. Detta kan ske genom att koppla  
strömriktaren som en vs-flerfaskopplare. I princip kan start även ske på så  
sätt att reglermaskinens statorlindning ansluts direkt till ett kraftnät och att  
20 rotorlindningarna hos reglermaskin och huvudmaskin via strömriktaren  
kopplas ihop och att yttre varierbart motstånd ansluts till huvudmaskinens  
statorlindning. Genom att under startförloppet styra den medroterande  
strömriktaren som vs-fasvinkel-/spänningsregulator kan det yttre motståndet  
vara ett fast motstånd. Både huvudmaskinen och reglermaskinen fungerar i  
25 en sådana kopplingar som roterande transformatorer. En närmare  
beskrivning av startkopplingar kommer att redovisas under beskrivningen av  
utföringsformer.

För ett normalt varvtalsreglerområde och normal kapacitet avseende reaktiv  
30 effekt hos konstantfrekvensmaskinen dimensioneras reglermaskinen för ca  
30 % av huvudmaskinens effekt. Detta medger en möjlighet att vid start  
använda reglermaskinen som en startmotor vars statorlindning matas från en  
separat frekvensomriktare. En förutsättning är då att den medroterande  
strömriktaren är kopplad som en vs-kortslutare av reglermaskinens  
35 rotorlindningar. En sådan koppling kommer också att redovisas under  
beskrivningen av utföringsformer.

Dessa alternativa startmetoder medför att övre effektgräns för motordrifter  
vid start på svaga kraftnät kan höjas till minst 40 MW.

5 Tekniskt sett fungerar huvudmaskinens stator- och rotorlindningar med respektive stator- och rotorkärnor som en enhet som

- ♦ skapar moment och roterande rörelse
- 10 ♦ anpassar inkommande hög-/mellanspänning till mellan-/lågspänning som är optimal för för såväl den medroterande vs-vs-omvandlaren som reglermaskinen
- 15 ♦ bildar en "step-down"-effekttransformator mellan elkraftnätet och kraftelektroniken
- 20 ♦ med högspänningskabel i statorn kan ha ett omsättningsförhållande mellan statorspänningen och rotorspänningen som kan uppgå till 100 – 300 gånger utan att kapacitivt orsakade förstärkningar av högfrekventa spänningar från/till elkraftnätet eller hjälpktaftlindningen uppträder
- 25 ♦ med huvudmaskinens lindningar och kärnor filtrerar de i vs-vs-omvandlaren alstrade och mot huvudmaskinen vända under-/övertoner i ström och förhindrar således dessa från att överföras till elkraftnätet via huvudmaskinens statorlindning.

Tekniskt sett fungerar reglermaskinens stator- och rotorlindningar med respektive stator- och rotorkärnor som en enhet som

- 30 ♦ via lämpligt val av poltal skapar en högre frekvens, 50 – 150 Hz, än det matande kraftnätet och därvid
- ♦ vid normal drift ger förutsättningar för en bra sinusform för den via vs-vs-omvandlaren alstrade rotorströmmen hos huvudmaskinen
- 35 ♦ med reglermaskinens lindningar och kärnor vid normal drift filtrerar de i vs-vs-omvandlaren alstrade och mot reglermaskinen vända under-/övertoner i ström och förhindrar således dessa från att överföras via reglermaskinens statorlindning och hjälpspänningslindningen på
- 40 huvudmaskinen till elkraftnätet respektive via reglermaskinens statorlindning till extern matningskälla

- 5 ♦ vid transienta förlopp som start och kontrollerad bromsning och stopp fungerar som en "roterande transformator" som leder de därvid associerade förlusterna från de roterande delarna av huvudmaskinen till yttre motstånd.
- 10 En beskrivning av de tekniska funktionerna hos den medroterande strömriktaren redovisas under beskrivningen av utföringsformer.

## RITNINGSFÖRTECKNING

- 15 Figur 1 visar blockscheman över de strömriktare som förekommer i beskrivningen.
- 20 Figur 2 visar principiellt hur borstlösa matare för likströms magnetisering kommer till användning i samband med konventionella elgeneratorer, dvs med spänning upp till 25 kV.
- 25 Figur 3 visar principiellt hur borstlösa magnetiseringsmatare kommer till användning i samband med elgeneratorer utformade enligt WO 97/45919, dvs med än högre spänningar.
- 30 Figur 4 visar principiellt hur borstlösa magnetiseringsmatare kommer till användning i samband med elgeneratorer utformade enligt W097/45907, dvs som en högspänningsgenerator med 2x3-fas för matning av en HVDC-anläggning.
- 35 Figur 5 visar principiellt den elkraftgenererande delen av en anläggning som framgår av US 5,742,515, "Asynchronous conversion method and apparatus for use with variable speed turbine hydroelectric generation".
- 40 Figur 6 visar principiellt den elkraftgenererande delen av en anläggning som framgår av en artikel där "ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant".
- Figur 7 visar principiellt hur en statisk Kramerdrift är utformad.
- Figur 8 visar principiellt hur en statisk Scherbiusdrift är utformad.

- 5 Figur 9 visar hur yttre rotormotstånd ansluts till rotorlindningen via släpringar under ett startförlopp.

Figur 10 visar en principiell utföringsform av en maskin enligt uppfinningen använd som elgenerator för konventionell högspänning, dvs för spänningar  
10 upp till 25 kV.

Figur 11a visar en principiell utföringsform av en maskin enligt uppfinningen använd som elgenerator utformad enligt WO 97/45919, dvs med än högre spänningar.

15 Figur 11b visar en utföringsform av en axiell ändvy av en maskin enligt uppfinningen använd som elgenerator för högspänning med motsvarighet till maskiner enligt WO 97/45919.

20 Figur 12 visar en principiell utföringsform av en maskin enligt uppfinningen använd som motor för konventionell högspänning, dvs för spänningar upp till 25 kV.

Figur 13 visar ett principiellt kopplingsschema för både huvudmaskinens  
25 och reglermaskinens lindningar med den medroterande strömriktaren i form av en matrisomvandlare med dubbelriktade ventiler.

Figur 14 visar exempel på alternativa dubbelriktade styrbara/släckbara  
30 ventiler.

Figur 15 visar ett principiellt kopplingsschema för både huvudmaskinens och reglermaskinens lindningar med den medroterande strömriktaren i form av en spänningsstyv direktomvandlare med antiparallellkopplade  
35 tyristorbryggor.

Figur 16 visar ett principiellt kopplingsschema för huvudmaskinens och reglermaskinens lindningar samt indikering av den medroterande strömriktarens olika funktioner.

40 Figur 17 visar ett principiellt kopplingsschema för huvudmaskinens och reglermaskinens lindningar samt indikering av den medroterande strömriktarens funktion då ett yttre varierbart motstånd är anslutet till reglermaskinens statorlindning.

- 5 Figur 18 visar ett principiellt kopplingsschema för start med yttre motstånd anslutet till reglermaskinens statorlindning och med strömriktaren i form av en matrisomvandlare nyttjad som en vs-flerfaskopplare.

- 10 Figur 19 visar ett principiellt kopplingsschema för start med yttre motstånd anslutet till reglermaskinens statorlindning och med strömriktaren i form av antiparallellkopplade tyristorbryggor nyttjade som en vs-flerfaskopplare.

Figur 20 visar en startkoppling av huvudmaskinen med reglermaskinen som startmotor vars statorlindning matas från en separat frekvensomriktare.

- 15 Figur 21 visar hur huvudmaskinens stator är försedd med en lindning för hjälpspänningsmatning av reglermaskinens stator.

## 20 BESKRIVNING AV UTFÖRINGSFORMER

- Den i konstantfrekvensmaskinen enligt uppfinningen för huvudfunktionen ingående kraftelektroniken finns i de roterande delarna av maskinen. Optimala spänningsnivåer i rotorkretsarnas lindningar bestäms, oberoende av nätspänningen, främst av krafthalvledarnas maximalt tillåtna
- 25 spänningsnivåer och aktuell koppling samt med och utan seriekopplade halvledare. När det gäller huvudmaskinens statorlindning finns däremot inga sådana begränsningar. Den kan därför tillverkas för direkt anslutning till högspända elkraftnät. Detta möjliggörs genom att statorlindningen
- 30 tillverkas/lindas med högspänningskablar, bl a enligt WO 97/45919. Statorns laminerade magnetkrets skall därför först beskrivas med utgångspunkt från användning av högspänningskablar i statorlindningen.

- Exempel på utföringsform av en axiell ändvy 31 hos en sektor/poldelning
- 35 hos en huvudmaskin enligt uppfinningen för högspänning framgår av figur 11b. Varje sektor/poldelning är på konventionellt sätt sammansatt av sektorformade elplåtar. Maskinernas stator kommer således att bestå av ett antal sektorer/poldelningar som tillsammans bildar en laminerad statorkärna. Från ett radiellt ytterst beläget rygparti 32 av kärnan sträcker sig ett antal
- 40 tänder 33 radiellt in mot rotorn. Mellan tänderna finns ett motsvarande antal spår 34. Användning av ovan nämnda högspänningskabel 35 medför bl a att spårens djup för högspänningsmaskiner görs större än vad som har krävts enligt teknikens ståndpunkt. Spåret har ett mot rotorn avtrappat tvärsnitt eftersom behovet av kabelisolation blir lägre för varje lindningsskikt in mot

5    rotorn. Som det framgår av figuren består spåret av i huvudsak ett cirkulärt  
 tvärsnitt 36 kring varje skikt hos lindningen med smalare midjepartier 37  
 mellan skikten. Ett sådant spår tvärsnitt kan med viss rätt omtalas som ett  
 "cykelkedjespår". Eftersom det i en sådan högspänningsmaskin kommer att  
 10    behövas ett relativt stort antal skikt och tillgången på aktuella  
 kabeldimensioner vad isolation och yttre halvledare beträffar är begränsat,  
 kan det i praktiken bli svårt att åstadkomma en önskvärd kontinuerlig  
 avtrappning av kabelisolationen respektive statorspåret. I det i figur 11b  
 visade utföringsexemplet användes kablar med tre olika dimensioner på  
 kabelisolationen, anordnade i tre i överensstämmelse därmed  
 15    dimensionerade sektioner 38, 39 och 40, dvs i praktiken kommer man att ha  
 ett modifierat cykelkedjespår. Av figuren framgår också att statortanden kan  
 utformas med en praktiskt taget konstant radiell bredd utmed hela spårets  
 djup. Statorn kan vara försedd med en lindning 41 för hjälpkraftsmatning, t  
 ex för reglermaskinens statorlindning.

20    Eftersom även rotorn är försedd med en vs-lindning kommer dess kärna att  
 bestå av ett, med ett från från statorn något skilt spår, utförande av ett  
 antal laminerade sektorer/podelningar med rotorspår 42 för rotorlindningen  
 43. Rotorlindningen skall matas från vs-vs-omvandlaren 44 med en spänning  
 25    med den aktuella skillnadsfrekvensen. Rotorlindningens  
 spänningsdimensionering blir då i huvudsak bestämd av de högsta tillåtna  
 spänningsnivåerna i de i vs-vs-omvandlaren ingående krafthalvledarna.  
 Detta blir i sin tur bestämmande för utformningen av rotorlindningen. Den  
 kan således utformas enligt känd teknik för konventionella hög-  
 30    /mellanspänningsmaskiner eller som den ovan anförda med  
 högspänningskabel, dvs enligt WO 97/45919.

Den i figur 11a visade medroterande vs-vs-omvandlaren 44 skall kunna  
 omvandla den relativt höga frekvensen, 50 – 150 Hz, hos den i  
 35    rotorlindningen hos reglermaskinen genererade spänningen till  
 skillnadsfrekvensen, 0 – 10 Hz, beroende på aktuellt reglerområde. Om  
 omvandlaren utförs med kiselbaserade krafthalvledare/ventiler med en ventil  
 i omvandlarens grenar kommer huvudmaskinens och reglermaskinens  
 rotorlindningar att dimensioneras för 1 – 3 kV. Om omvandlaren utförs med  
 40    kiselkarbidbaserade krafthalvledare/ventiler med en ventil i omvandlarens  
 grenar blir motsvarande spänningsnivåer däremot 10 – 30 kV.  
 Dimensionerande vad avser spänning för huvudmaskinens och  
 reglermaskinens rotorlindningar blir tillgång till, val av och koppling, dvs  
 utan eller med seriekoppling, av krafthalvledare för

5 vs-vs-omvandlaren.

Figur 13 visar ett principiellt kopplingsschema för både huvudmaskinens och reglermaskinens lindningar med den medroterande vs-vs-omvandlaren i form av en matrisomvandlare med dubbelriktade ventiler. I det visade  
 10 exemplet är både huvudmaskinens statorlindning 45 och rotorlindning 46 ritade som Y-kopplade trefaslindningar. Matrisomvandlaren 47, med nödvändiga shuntkondensatorer för att skapa en högfrekvensmässigt lågimpediv slinga där strömmen enkelt kan kommutera mellan faserna i reglermaskinens rotorlindning, är kopplad mellan huvudmaskinens  
 15 växelströmsrotorlindning och reglermaskinens växelströmsrotorlindning 48. De ovan nämnda "kommuteringsöverlappningarna pga "svagt nät"-karaktär hos de roterande lindningarna" elimineras med matrisomvandlaren och dess shuntkondensatorer. Reglermaskinen kan därmed utföras för lägre typeffekt. Reglermaskinens statorlindning 49 är i den visade utföringsformen visad  
 20 som en trefaslindning.

Figur 14a, 14b och 14c anger alternativa dubbelriktade ventiler i matrisomvandlaren. Den följande identifieringen kräver viss fackkunskap. Figur 14a visar en dubbelriktad ventil i form av två GTO-tyristorer eller två  
 25 IGCT-er. Figur 14b visar en dubbelriktad ventil med två IGBT-er. Figur 14c visar en dubbelriktad ventil med en IGBT.

Figur 15 visar ett principiellt kopplingsschema för både huvudmaskinens och reglermaskinens lindningar med den medroterande vs-vs-omvandlaren i form av en spänningsstyv direktomvandlare med antiparallellkopplade  
 30 tyristorbryggor. På samma sätt som i figur 13 är både huvudmaskinens statorlindning 45 och rotorlindning 46 ritade som Y-kopplade trefaslindningar. Den spänningsstyva direktomvandlaren med antiparallellkopplade tyristorer 50 är kopplad mellan huvudmaskinens  
 35 växelströmsrotorlindning och reglermaskinens växelströmsrotorlindning 48. På samma sätt som för matrisomvandlaren kan, för att underlätta kommuteringen, även här kondensatorer serie- eller shuntkopplas mellan reglermaskinens rotorlindning och vs-vs-omvandlaren respektive mellan huvudmaskinens rotorlindning och vs-vs-omvandlaren. De kan också  
 40 anslutas i serie och/eller parallellt till inre uttag inne i reglermaskinens rotorlindning. Inkoppling av kondensatorer på detta sätt innebär att reglermaskinen kan utföras för lägre typeffekt. Reglermaskinens statorlindning 49 är i den visade utföringsformen även här visad som en trefaslindning.

- 5 Som det har omtalats tidigare finns inom ramen för uppfinningen ett flertal olika alternativa utföringsformer för både huvudmaskinens och reglermaskinens lindningar.

- När det gäller huvudmaskinens statorlindning är en föredragen  
10 utföringsform en trefaslindning som den i figurerna 13 och 15 visade, dvs en konventionell Y-kopplad lindning. Då maskinen är aktuell i en HVDC-anläggning kommer statorlindningen att utformas med 2x3-faslindning med 30 graders fasförskjutning som bl a framgår av figur 4. Andra  
15 lindningsformer, t ex 1-fas, 2-fas och flerfas, 2x2-fas m fl kan bli aktuella för specifika ändamål. Vad statorlindningens spänningsnivå beträffar kan maskinen dimensioneras för konventionell "maskin"-högspänning, dvs upp till 25 kV, eller den kan med högspänningskabel dimensioneras för väsentligt högre spänningar. I vissa applikationssammanhang kan statorn  
20 försees med en extra lindning för alstring av hjälpkraft till t ex reglermaskinens styrning/reglering m m vilket bl a visas i figur 21.

- I en föredragen utföringsform är också huvudmaskinens växelströmsrotorlindning en Y-kopplad trefaslindning, som de i figurerna 13 och 15 visade. Även här kan av olika skäl trefaslindningen D-kopplas,  
25 lindningen kan utformas som en 2x3-faslindning och andra tidigare omtalade lindningsformer kan vara aktuella.

- Även när det gäller reglermaskinens växelströmsrotorlindning är den i figurerna 13 och 15 visade Y-kopplade trefaslindningen en föredragen  
30 utföringsform, men kan utföras D-kopplat eller med t ex 1-fas, 2-fas och flerfas, 2x3-fas, 2x2-fas m fl. Vs-vs-omvandlaren kan också matas med enfas växelström från reglermaskinens rotorlindning. Andra lindningsformer kan vara aktuella i samband med specifika applikationer.

- 35 Av figurerna 13 och 15 framgår att reglermaskinens statorlindning också kan utformas som en Y-kopplad trefaslindning. Som omtalat tidigare kan reglermaskinens stator vara utformad med utpräglade poler för likströmsmagnetisering och den kan även vara utformad med permanenta magneter. Även om statorlindningen består av en trefaslindning kan den  
40 genom viss omkoppling användas för likströmsmagnetisering. Utformningen av reglermaskinens statorlindning bestäms ofta av hur maskinen skall startas från stillestånd upp till aktuellt varvtalsområde.



- 5    Gemensamt för aktuella tillämpningar med konstantfrekvensmaskinen är att lasten endast har behov av ett begränsat reglerområde kring huvudmaskinens synkrona varvtal.

- 10   En växelströmsmaskin enligt uppfinningen har ett stort antal tillämpningsområden vad gäller motordrifter. Det finns processer med motordrifter som av olika skäl för närvarande inte använder varvtalsstyrning men som med växelströmsmaskiner enligt uppfinningen skulle kunna väsentligt förbättras.

- 15   Maskinens statorlindning kan dimensioneras för anslutning till matande kraftnät med spänning från etablerad lågspänning upp till klassiska högspänningsnivåer. Bestämmande för aktuell spänning på statorlindningen är i stort sett tillgänglig nätspänning och aktuellt effektområde.

- 20   För motoreffekter på enstaka megawatt ansluts statorlindningen företrädesvis till en mellanspänningsnivå mellan 1 och 36 kV.

- 25   Vid märkeffekter över 10 MW kan maskinens anslutning till matande nät företrädesvis dimensioneras för 50 kV eller högre, t ex 130 kV, dvs anslutas till transmissions- och distributionsnät. Genom anslutning till dessa nätspänningsnivåer undviks framför allt höga strömkrafter och spänningsfall i kraftnätet under startförloppet.

- 30   Som omtalat i ingressen till redogörelsen för uppfinningen är den medroterande strömriktaren omkopplingsbar för flera olika funktioner. Förutom funktionen som vs-vs-omvandlare under drift kan den också kopplas för flera funktioner i samband med start och kontrollerad stopp av konstantfrekvensmaskinen. I figur 16 visas den föredragna utföringsformen vad avser lindningarnas utformning vid drift samt en sammanfattning av  
35   strömriktarens 51 funktioner både under drift, start och stopp. Kontrollerad bromsning och stopp beskrivs senare. Strömriktarens funktioner vid reglerad drift och start är som följer:

- 40   ♦ Strömriktarens funktion 51a motsvarar dess funktion under drift, dvs som en vs-vs-omvandlare enligt tidigare given definition.
- ♦ Strömriktarens funktion 51b motsvarar dess funktion under start som vs-flerfaskopplare som elektroniskt sammankopplar in- och utgående anslutningar för hopkoppling av huvudmaskinens och reglermaskinens

5 rotorlindningar då yttre varierbart motstånd 52 är anslutet till  
reglermaskinens statorlindning enligt figur 17.

♦ Strömriktarens funktion 51c motsvarar dess funktion under start som  
vs-fasvinkel-/spänningsregulator mellan huvudmaskinens- och  
10 reglermaskinens rotorlindningar då yttre fast motstånd är anslutet till  
reglermaskinens statorlindning.

♦ Strömriktarens funktion 51d motsvarar dess funktion under start som  
vs-kortslutningskopplare av reglermaskinens rotorlindningar vid direkt  
15 anslutning av reglermaskinens statorlindning till ett kraftnät enligt figur  
18.

Figur 18 visar i övrigt ett principiellt kopplingsschema för start av  
konstantfrekvensmaskinen genom direktanslutning av huvudmaskinen till ett  
20 kraftnät. Start sker på tidigare omtalat sätt med yttre trefasigt reglerbart  
motstånd 52 kopplat till reglermaskinens trefasiga statorlindning.  
Strömriktaren är nu kopplad som en vs-flerfaskopplare enligt 51b som  
sammanbinder varje fasanslutning hos huvudmaskinens rotorlindning direkt  
till motsvarande fasanslutning hos reglermaskinens rotorlindning.  
25 Huvudmaskinens startförluster kopplas nu transformatoriskt till  
reglermaskinen som sedan via sin statorlindning överför förlusterna till de  
yttre motstånden.

Funktionen hos strömriktaren då den skall fungera som vs-flerfaskopplare  
30 kan åstadkommas på olika sätt. Figuren 18 visar i detalj hur strömriktaren är  
anordnad som flerfaskopplare med matrisomvandlare. Denna funktion  
erhålles genom att "tända" en ventil, den grovmarkerade, i varje gren. Figur  
19 visar funktionen som vs-flerfaskopplare med strömriktaren i form av  
antiparallellkopplade tyristorbryggor 50a och 50b. Som det framgår är det nu  
35 lämpligt att huvudmaskinens rotorlindning består av 2x3-faslindningar 46a  
och 46b för 6-puls-kopplade tyristorbryggor där varje brygga behöver förses  
med ett par antiparallellkopplade, grovmarkerade, tyristorer och med  
motsvarande rotorlindningar 48a och 48b hos reglermaskinen.

40 För ett normalt varvtalsreglerområde hos konstantfrekvensmaskinen  
dimensioneras reglermaskinen för ca 30 % av huvudmaskinens effekt. Detta  
medger en möjlighet att vid start använda reglermaskinen som en startmotor  
vars statorlindning matas från en separat, ej medroterande, frekvens-  
omriktare 53. En förutsättning då är att den medroterande strömriktaren är

- 5 kopplad som en vs-kortslutningskopplare, dvs som funktionen 51d, av reglermaskinens rotorlindningar. Ett sådant startkoppling med frekvensomriktaren 53 visas principiellt i figur 20.

10 Kontrollerad bromsning från reglerområdet till stillastående utförs med samma huvudkretsar som för start, dvs som figurerna 18 och 19. Därvid nyttjas den medroterande strömriktaren som

- 15 ♦ vs-flerfaskopplare, dvs som 51b ovan, mellan huvudmaskinens- och reglermaskinens rotorlindningar för styrning av aktiv och reaktiv effekt genom direkt hopkoppling av lindningarna med och/eller utan skifte av fasföljden. Förloppet utförs genom s k motströmsbromsning och den med det transienta förloppet associerade effektutvecklingen sker i yttre variabelt motstånd 52. Dessutom får ett byte av fasföljd ske hos den till huvudmaskinens statorlindning anslutna växelspänningen eller som
- 20 ♦ vs- fasvinkel-/spänningsregulator, dvs som 51c ovan, varvid det yttre motståndet är fast och styrningen sker genom den andel av rotorkretsens växelström som släpps igenom. Även här måste ett byte av fasföljd ske hos den till huvudmaskinens statorlindning anslutna växelspänningen.
- 25 ♦ en vs-kortslutningskopplare, dvs som 51d ovan, för kontrollerad bromsning med hjälp av en frekvensomvandlare 53 i figur 20. Byte av fasföljd för anslutningen till reglermaskinens statorlindning från frekvensomvandlaren måste ske. Frekvensomvandlaren måste kunna
- 30 återmata energi till kraftnätet eller utveckla bromsenergin i yttre motstånd.

35 I figur 21 visas hur huvudmaskinens stator är försedd med en lindning 54 för hjälpspänningsmatning av reglermaskinens stator med likström via en styrd strömriktare 56. Vid likströmsmagnetisering av reglermaskinens statorlindning måste en av faslindningarna vändas jämfört med anslutning till trefas växelströmsnät.

40 Ett exempel på en motordrift som med fördel skulle använda en maskin enligt uppfinningen är s k raffinödrifter. Enligt nuvarande teknik framställs t ex tidningspapper med konstantvarviga synkrona motorer som begränsas till ca 25 MW p g a problemet med start mot svaga kraftnät. En motordrift enligt uppfinningen skulle dessutom kunna medföra ökad produktionshastighet i befintliga anläggningar.

5

Släpringade statiska Kramer- och Scherbiusdrifter för pumpar och fläktar skulle med fördel kunna ersättas av maskiner enligt uppfinningen.

10

Vindtunneldrifter är ett exempel på högeffektanläggningar på över 100 MW som är väl lämpade för växelströmsmaskiner enligt uppfinningen. Dessa utförs f n som varvtalsreglerade system med synkronmaskiner med utpräglade poler och strömmellanledsströmriktare för full effekt.

15

Reglermaskinen statorlindning kan under drift vara ansluten till ett lågeffekts likströmsnät eller till ett växelströms en- eller trefasnät. Dessa nät kan anordnas genom att nyttja den ovan nämnda hjälpkraftlindningen i huvudmaskinens stator. Detta innebär att konstantfrekvensmaskinen har en enda anslutning till matande kraftnät varvid man spar en transformator. Om inte yttre motstånd kommer till användning under startförloppet kan

20

reglermaskinen utföras med permanenta magneter.

Parallellkoppling av krafthalvledare respektive parallellkoppling av strömriktarmoduler för t ex 2x3-fas är att föredra för drifter utförda med maskiner enligt uppfinningen. Om rotorspänningen väljs inom området

25

1 - 15 kV, dvs om lindningarna är utformade som plock- eller formhärvlindningar, erhålls god fyllfaktor för maskinernas rotorspår. Än högre rotorspänningar på upp till flera tiotals kV, dvs för maskiner enligt WO 97/45919, kan bli aktuella då krafthalvledarna för vs-vs-omvandlaren kommer upp till sådana nivåer.

30

35

40

## 5 PATENTKRAV

1. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal innefattande minst en första och en andra roterande elektrisk maskin med en gemensam axel och en på axeln medroterande strömriktare k ä n n e t e c k n a d av att  
 10 den första elektriska maskinen (1), huvudmaskin, innefattar en stator och en rotor och att både stator och rotor är anordnad med växelströmslindningar (3, 7, 20, 21, 45, 46),

att den andra roterande elektriska maskinen (27), reglermaskin, innefattar en  
 15 stator och en rotor och att rotorn är anordnad med en växelströmslindning (29, 48),

att strömriktaren (28, 51), innefattande ett antal grenar med ventiler, är kopplad mellan huvudmaskinens och reglermaskinens rotorlindningar och  
 20 att den under drift är anordnad som en vs-vs-omvandlare (51a) och att den under start är anordnad som en vs-flerfaskopplare (51b) eller som en vs-fasvinkel-/spänningsregulator (51c) eller som en vs-kortslutningsomkopplare (51d) och att den under kontrollerad bromsning och stopp är anordnad som  
 25 en vs-flerfaskopplare (51b) eller som en vs-fasvinkel-/spänningsregulator (51c), eller som en vs-kortslutningskopplare (51d) och

att huvudmaskinens statorlindning (7, 20, 45) är ansluten till ett växelspännings kraftnät.

30 2. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att, då maskinen arbetar som elgenerator upprätthålls en konstant frekvens hos huvudmaskinens till kraftnätet matande spänning vid varierande varvtal genom att vs-vs-omvandlaren (51a) matar huvudmaskinens rotorlindning (3, 21, 46) med en  
 35 spänning med en frekvens som svarar mot skillnadsfrekvensen  $f_c$  mellan elgenerators synkrona frekvens  $f_r$  vid aktuellt varvtal  $n_r$  och kraftnätets nominella frekvens  $f_s$ .

3. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt  
 40 patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att, då maskinen arbetar som motor maskinens önskade varvtal erhålls genom att vs-vs-omvandlaren (51a) matar huvudmaskinens rotorlindning (3, 21, 46) med en spänning med en frekvens som svarar mot skillnadsfrekvensen  $f_c$  mellan matande kraftnäts frekvens  $f_s$  och maskinens synkrona frekvens  $f_r$  vid önskat varvtal  $n_r$ .

- 5 4. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att omsättningsförhållandet mellan statorlindning och rotorlindning är anpassat till förhållandet mellan elkraftnätets spänning och maximal tillåten spänning hos strömriktaren med en ventil i varje av vs-vs-omvandlarens grenar.
- 10 5. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att huvudmaskinens statorlindning (7, 20, 45) är utförd av minst en kabel.
- 15 6. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1 och 5, k ä n n e t e c k n a d av att då huvudmaskinens statorlindning (7, 20, 45) är utförd av minst en kabel är kabeln/kablarna av högspänningstyp.
- 20 7. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att huvudmaskinens statorlindning (7, 20, 45) är direkt ansluten till växelspanningsnätet.
- 25 8. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att huvudmaskinens statorlindning (7, 20, 45) är ansluten till växelspanningsnätet via en transformator (8).
- 30 9. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att huvudmaskinens statorlindning (7, 20, 45) är utformad som en 3-faslindning, 2-faslindning, en 2 x 3-faslindning eller av ett valfritt antal faslindningar.
- 35 10. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att huvudmaskinens stator förutom statorlindningen (7, 20, 45) som är ansluten till växelspanningsnätet är anordnad med en hjälplindning (41) för alstring av växelspanningshjälpkraft.
- 40 11. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att huvudmaskinens rotorlindning (3, 21, 46) är utformad som en 3-faslindning, 2-faslindning, en 2 x 3-faslindning eller av ett valfritt antal faslindningar.
12. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att reglermaskinens rotorlindning (3,

- 5 21, 46) är utformad som en 3-faslindning, 2-faslindning, en 2 x 3-faslindning eller av ett valfritt antal faslindningar.

13. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att reglermaskinens stator är utformad  
10 med en likströmslindning (30, 49).

14. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att reglermaskinens statorlindning (30, 49) är utformad som en växelströmslindning för 3-fas, 2-faslindning, en 2 x  
15 3-faslindning eller av ett valfritt antal faslindningar.

15. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vs-vs-omvandlaren (28, 51) är anordnad att arbeta med varierande både in- och utfrekvenser.  
20

16. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vs-vs-omvandlaren (28, 51) är anordnad att arbeta med varierande kvot mellan dess in- och utfrekvenser.

25 17. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vs-vs-omvandlaren (28, 51) är självkommuterad.

18. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vs-vs-omvandlaren (28, 51) är maskinkommuterad.  
30

19. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vs-vs-omvandlaren (28, 51) kommuteras av reglermaskinen.  
35

20. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vs-vs-omvandlaren (28, 51) är utformad som en matrisomvandlare (47).  
40

21. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vs-vs-omvandlaren (28, 51) är

5 utformad som en direktomvandlare med antiparallellkopplade  
tyristorbryggor (50).

22. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt  
patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att seriekondensatorer är kopplade  
10 mellan vs-vs-omvandlaren (28, 47, 50, 51) och reglermaskinens  
rotorlindningar (29, 48).

23. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt  
patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att shuntkondensatorer är kopplade  
15 mellan vs-vs-omvandlaren (28, 47, 50, 51) och reglermaskinens  
rotorlindningar (29, 48).

24. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt  
patentkrav 1, 21 och 22, k ä n n e t e c k n a d av att kondensatorerna ansluts  
20 i serie och/eller parallellt till reglermaskinens rotorlindningar (29, 48).

25. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt  
patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vs-vs-omvandlaren (28, 51) är  
utformad med likströms-/likspänningsmellanled.

26. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt  
patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att reglermaskinen under kontrollerad  
start/ bromsning/stopp är anordnad som en start-/bromsmotor vars  
statorlindning (49) är ansluten till en extern frekvensomriktare (53) och vars  
30 rotorlindning (48) är kortsluten av konstantfrekvensmaskinens strömriktare  
kopplad som vs-kortslutningskopplare (51d).

27. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt  
patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vid start/stopp är huvudmaskinens  
35 statorlindning kopplad till kraftnätet, huvudmaskinens rotorlindning är  
kopplad till reglermaskinens rotorlindning via strömriktaren anordnad som  
vs-flerfaskopplare (51b) och reglermaskinens statorlindning (49) är kopplad  
till yttre reglerbara motstånd.

40 28. Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal enligt  
patentkrav 1, k ä n n e t e c k n a d av att vid kontrollerad start/  
bromsning/stopp är huvudmaskinens statorlindning kopplad till kraftnätet,  
huvudmaskinens rotorlindning är kopplad till reglermaskinens rotorlindning



- 5 via strömriktaren anordnad som vs-fasvinkel-/spänningsregulator (51c) och reglermaskinens statorlindning (49) är kopplad till yttre fasta motstånd

29. Förfarande vid användning av en medroterande strömriktare (28, 51) anordnad mellan en huvudmaskins (1) och en reglermaskins (27) rotorlindningar (3, 29) hos en konstantfrekvensmaskin vars huvudmaskin är  
10 försedd med en statorlindning anslutet till ett kraftnät enligt patentkrav 1, vilket förfarande k ä n n e t e c k n a s av att

- vid drift styrs strömriktaren som en vs-vs-omvandlare (51a) och  
15 vid start kopplas strömriktaren som en vs-flerfaskopplare (51b) eller som en vs-fasvinkel-/spänningsregulator (51c) eller som en vs-kortslutningskopplare (51d) och
- 20 vid kontrollerad bromsning och stopp kopplas strömriktaren som en vs-flerfaskopplare (51b) eller som en vs-fasvinkel-/spänningsregulator (51c) eller som en vs-kortslutningskopplare.

30. Förfarande vid användning av den medroterande strömriktaren enligt patentkrav 29 då konstantfrekvensmaskinen vid drift används som  
25 elgenerator, k ä n n e t e c k n a t av att vs-vs-omvandlaren anordnas att förse huvudmaskinens rotorlindning (3, 21, 46) med en spänning med en frekvens som svarar mot skillnadsfrekvensen mellan elgeneratorns synkrona frekvens vid aktuellt varvtal och kraftnätets nominella frekvens.

31. Förfarande vid användning av den medroterande strömriktaren enligt patentkrav 29 då konstantfrekvensmaskinen vid drift används som motor,  
30 k ä n n e t e c k n a t av att vs-vs-omvandlaren (51a) anordnas att förse huvudmaskinens rotorlindning (3, 21, 46) med en spänning med en frekvens som svarar mot skillnadsfrekvensen mellan matande kraftnäts frekvens och maskinens synkrona frekvens vid önskat varvtal.  
35

32. Förfarande vid användning av den medroterande strömriktaren enligt patentkrav 29 vid start och stopp, k ä n n e t e c k n a t av att vs-flerfaskopplaren (51b) anordnas för direkt hopkoppling av huvudmaskinens  
40 och reglermaskinens rotorlindningar.

5 33. Förfarande vid användning av den medroterande strömriktaren enligt patentkrav 29 vid start och kontrollerad bromsning och stopp, k ä n n e t e c k n a t a v a t t v s - f a s v i n k e l - / s p ä n n i n g s r e g u l a t o r n ( 5 1 c ) a n o r d n a s a t t k o n t r o l l e r a t ö v e r f ö r a h u v u d m a s k i n e n s r o t o r f ö r l u s t e r v i a r e g l e r m a s k i n e n t i l l y t t r e m o t s t å n d .

10 34. Förfarande vid användning av den medroterande strömriktaren enligt patentkrav 29 vid start, broms och/eller stopp, k ä n n e t e c k n a t a v a t t v s - k o r t s l u t n i n g s k o p p l a r e n ( 5 1 d ) a n o r d n a s a t t k o r t s l u t a r e g l e r m a s k i n e n s r o t o r l i n d n i n g a r .

15

20

25

30

35

40

5 KN 8631 SE  
GL  
1999-04-15

10

15

### SAMMANDRAG

20 Konstantfrekvensmaskin med varierande/varierbart varvtal som innefattar en  
huvudmaskin (1) och en reglermaskin med gemensam axel (2) och en  
medroterande strömriktare (28, 51) kopplad mellan huvudmaskinens och  
reglermaskinens rotorlindningar (3, 29) och att strömriktaren under drift är  
anordnad som en vs-vs-omvandlare och att den under start är anordnad som  
25 en vs-flerfaskopplare eller som en vs-fasvinkel-/spänningsregulator eller  
som en vs-kortslutningskopplare och att den under kontrollerad bromsning  
och stopp är anordnad som en vs- flerfaskopplare eller som en vs-fasvinkel-  
/spänningsregulator eller som en vs-kortslutningskopplare  
(Fig 16).

30

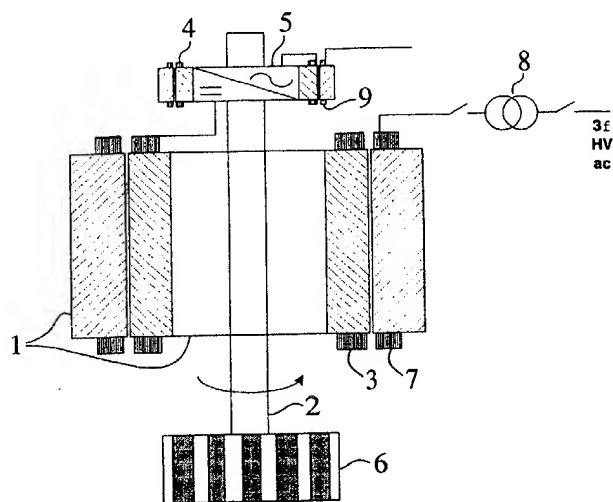
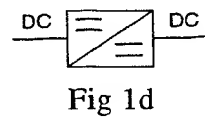
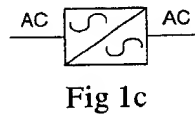
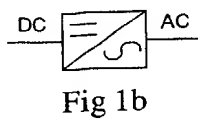
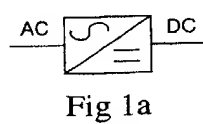


Fig 2

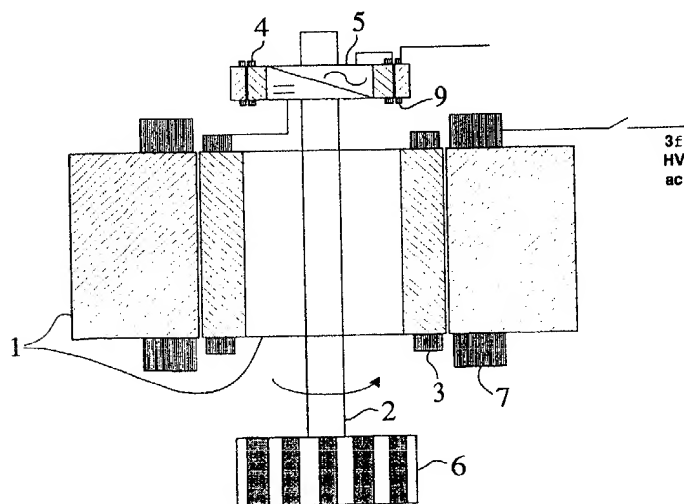


Fig 3

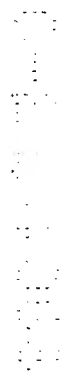


Fig 5

3/10

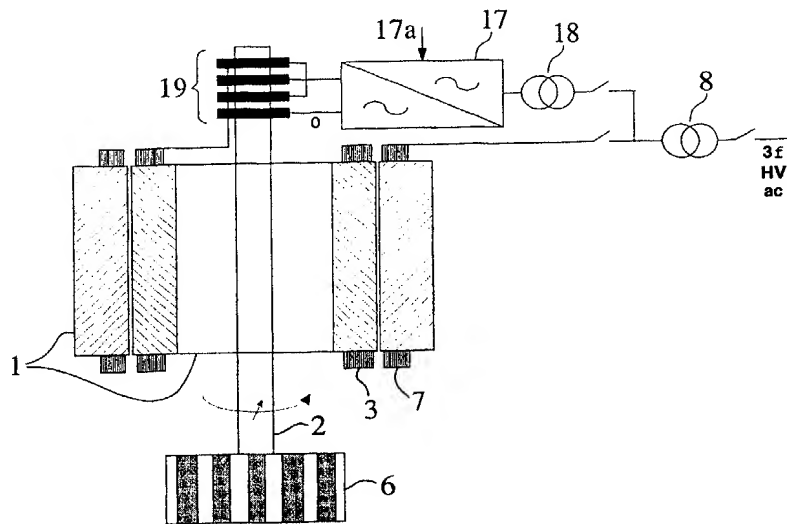


Fig 6

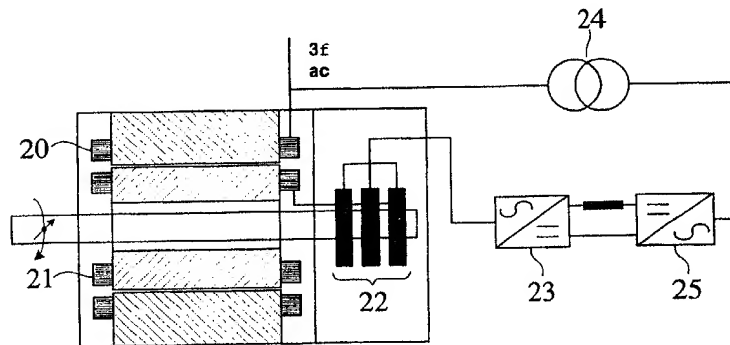


Fig 7

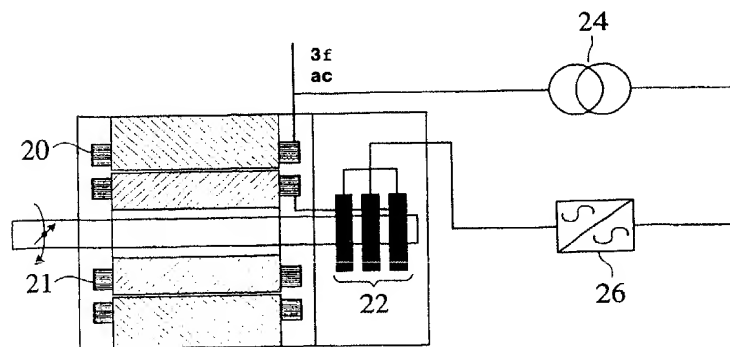


Fig 8

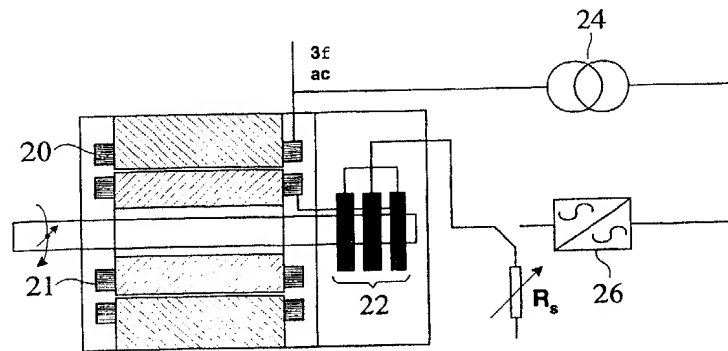


Fig 9

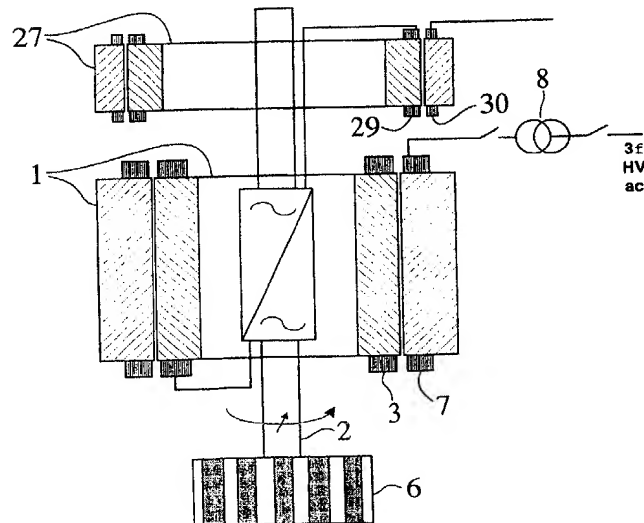


Fig 10

5/10

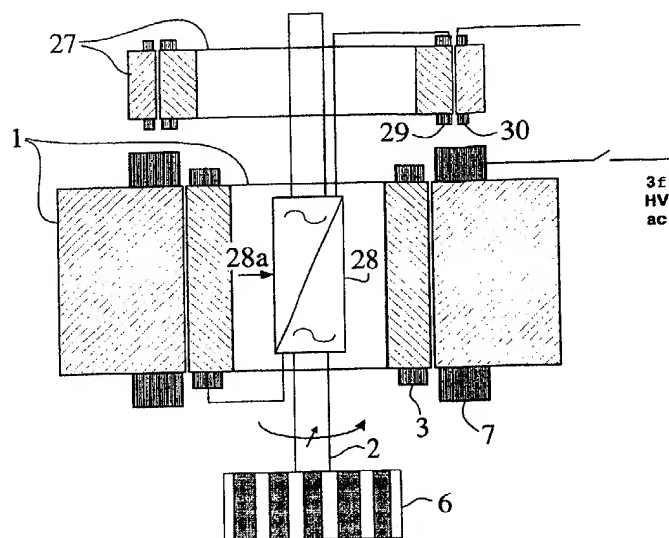


Fig 11a

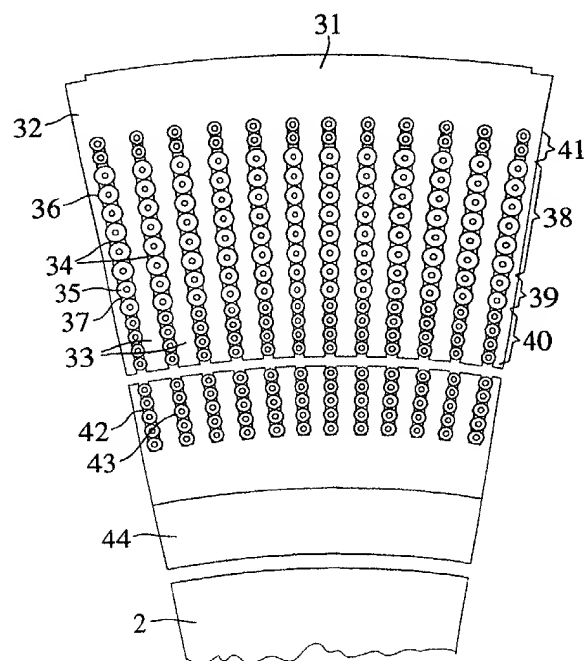


Fig 11b



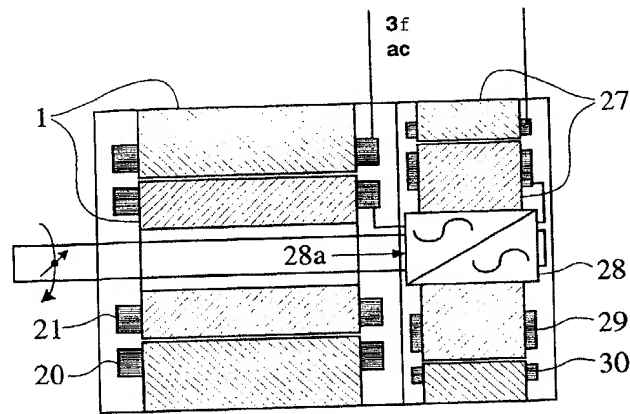


Fig 12

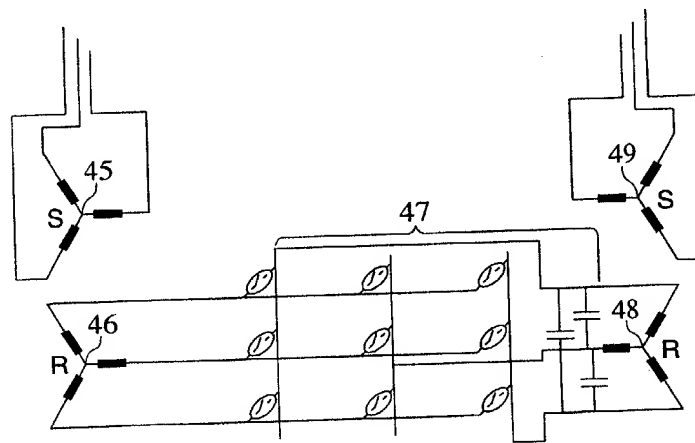


Fig 13



Fig 14a

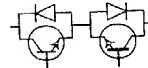


Fig 14b

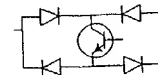


Fig 14c

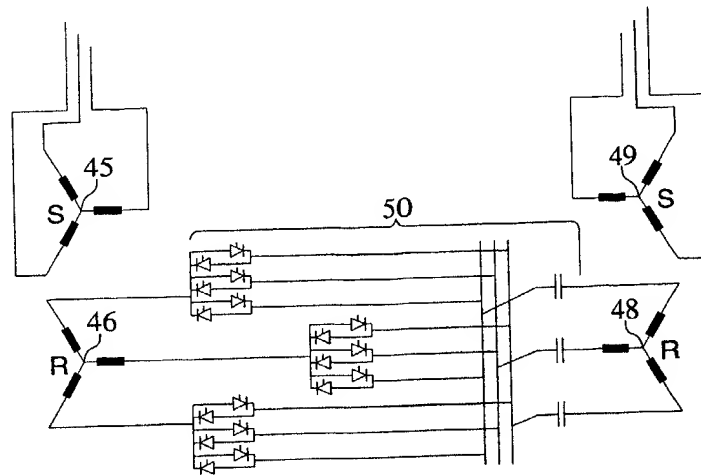


Fig 15

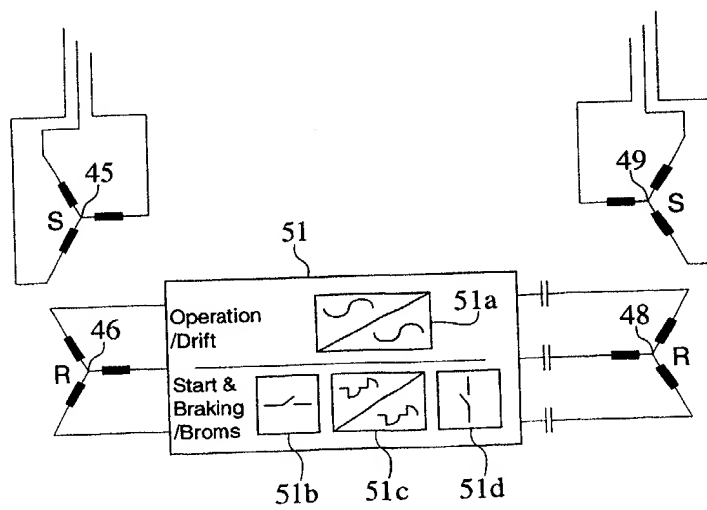


Fig 16

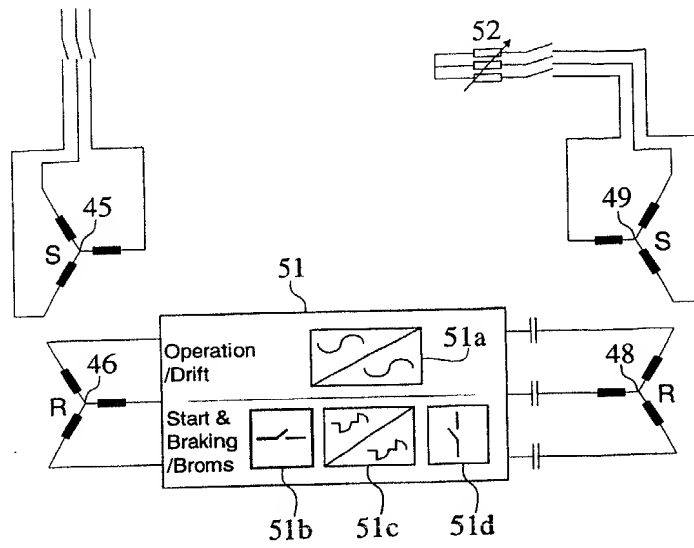


Fig 17

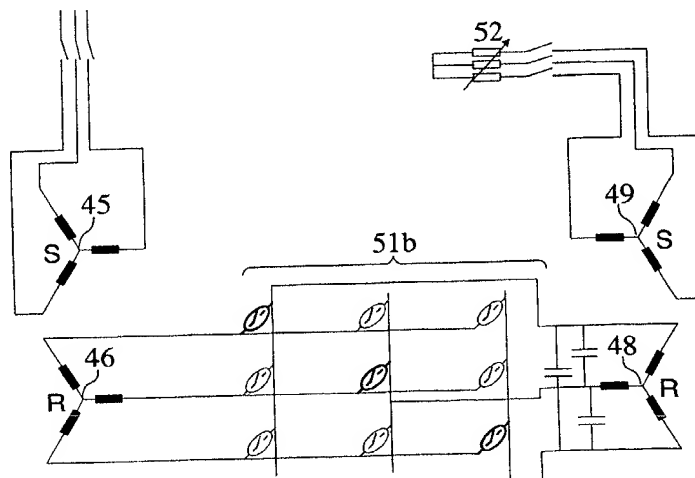


Fig 18

9/10

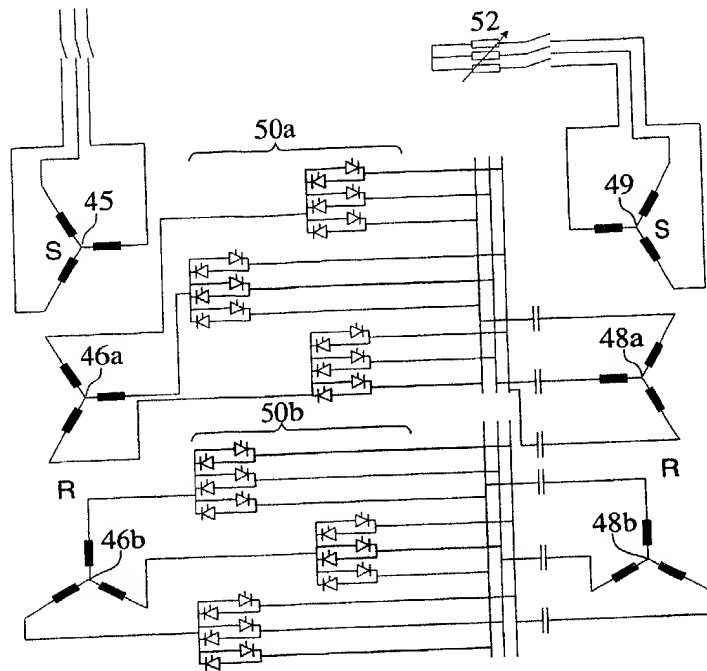


Fig 19

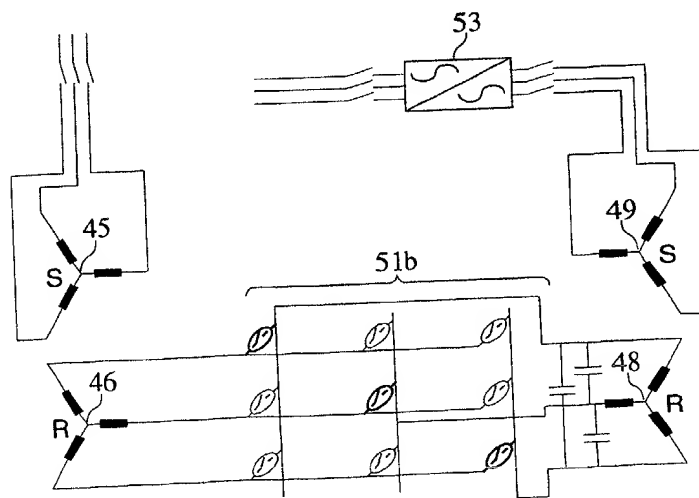


Fig 20

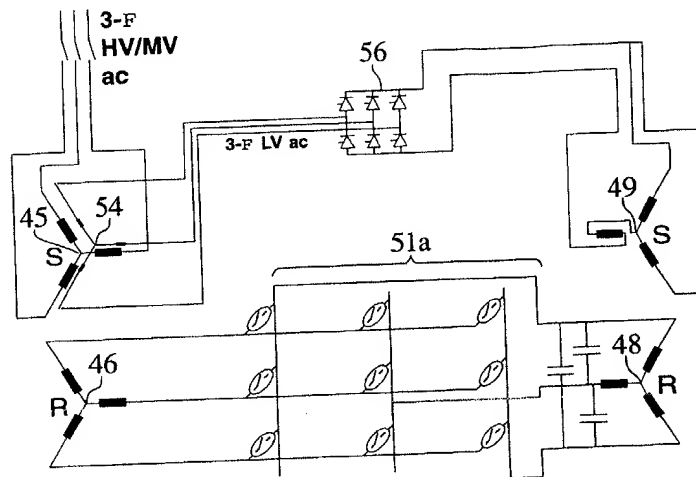


Fig 21